



## การออกแบบวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง

โดย

นางสาวกนกวรรณ	มกรพงศ์	B4509226
นางสาวอุษากานต์	พลพิทักษ์	B4510758
นายสมชาติ	อักโข	B4510871

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2548

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2545  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการ	การออกแบบวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง
ผู้ดำเนินงาน	1. นางสาวกนกวรรณ มกรพงศ์ B4509226 2. นางสาวอุษกานต์ พลพิทักษ์ B4510758 3. นายสมชาติ อักโง B4510871
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ชานูชัย ทองโสภณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	1/2548

---

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเหตุการณ์ข่าวสาร และความบันเทิงทุกรูปแบบ จากทั่วทุกมุมโลก สามารถนำเสนอได้ถึงภายในบ้าน โดยผ่านเครื่องรับโทรทัศน์ซึ่งเผยแพร่ได้ทั้งภาพและเสียงมาให้ฟังและเห็นพร้อมๆกัน แต่ในขณะเดียวกันเครื่องรับโทรทัศน์ในจังหวัดที่ห่างไกลออกไป หรือแถบชนาเมือง มักจะประสบปัญหา เนื่องด้วยระยะทางที่ไกลกว่าทำให้สัญญาณโทรทัศน์ที่เดินทางมายังสายอากาศรับ ลดความแรงลง ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขโดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง ( Outdoor Booster TV) เพื่อเพิ่มความเข้มของรับสัญญาณให้สูงขึ้น โครงการการออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบนกว้าง อันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ วงจรกรองความถี่(Filter)ทำหน้าที่กรองความถี่โทรทัศน์ในย่านใช้งาน LF(ความถี่ 40-60MHz), VHF(ความถี่ 170-230MHz) และ UHF(ความถี่ 400-600MHz) ส่วนที่สองคือวงจรขยายสัญญาณ(Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณหลังจากผ่านกระบวนการกรองความถี่แล้ว วงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้างหรือบูสเตอร์จะติดตั้งที่สายอากาศภายนอกบ้าน เพื่อรับสัญญาณโทรทัศน์จากแ่งรับสัญญาณสายอากาศ เข้าสู่อินพุตของวงจรบูสเตอร์ ผ่านกระบวนการกรองความถี่ฟิวเตอร์ ให้ได้ความถี่ที่ต้องการในย่าน LF, VHF และ UHF จากนั้นทำการขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ ในขณะเดียวกันอุปกรณ์ ชัปพลาจะคอยจ่ายกระแสเข้าไปไบแอสทรานซิสเตอร์ในวงจรให้ทำงาน ทำให้ผลของสัญญาณที่ได้มีความแรงสูงขึ้นโดยวัดได้จากเอาท์พุทของวงจร และสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องรับโทรทัศน์ทำให้สัญญาณภาพและเสียงมีความคมชัดมากขึ้น ช่วยเพิ่มอรรถรสในการรับชมให้ดียิ่งขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการการออกแบบวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้างในครั้งนี้ ขอมอบให้แก่บิดาและมารดาของข้าพเจ้า ผู้ที่ห่วงใย ให้อโอกาส ให้กำลังใจ และสนับสนุนทางการศึกษามา โดยตลอด

โครงการครั้งนี้ สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องจากความกรุณาของบุคคลหลายท่าน ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการ อันประกอบด้วย อาจารย์ ดร. ชานูชัย ทองโสภิต อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้เปิดโอกาสให้ผู้จัดทำได้สัมผัสและเรียนรู้เกี่ยวกับโครงการนี้ เป็นผู้ประสิทธิ์ ประสาทวิชาความรู้ รวมทั้งให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเกี่ยวกับโครงการ ท่านอาจารย์ในสาขาวิชาโทรคมนาคมทุกท่าน ผู้ให้ความรู้ในวิชาแขนงต่างๆตลอดระยะเวลา 3 ปี เป็นผลให้โครงการชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ และอาจารย์ ดร. นิमित ชมนาวัง ผู้ให้คำปรึกษา และแนะนำเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในส่วนที่ข้าพเจ้ามองข้ามไป

ขอขอบคุณประพล จาระตะคุ ผู้ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานประมาณ ในการดำเนินโครงการ และสั่งซื้ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ๆปริญญาโท และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือด้านความรู้ และเครื่องมือต่างๆ และสุดท้าย ขอขอบคุณความห่วงใย และกำลังใจ จากเพื่อนๆน้องๆ วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคน สำหรับมิตรภาพที่มีให้เสมอมา

นางสาวกนกวรรณ มกรพงศ์

นางสาวอุษุภานต์ พลพิทักษ์

นายสมชาติ อักโข

## สารบัญ

	หน้า
บทที่1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบข่ายของโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่2 ระบบโทรทัศน์และการแบ่งย่านความถี่ในประเทศไทย	3
บทที่3 หลักการเบื้องต้นของการส่งโทรทัศน์	5
บทที่4 ทฤษฎีและการทำงานของบูสเตอร์ (Booster)	11
บทที่5 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน	15
5.1 ตัวต้านทาน (Resistor)	15
5.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor or Condenser)	17
5.3 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)	17
5.4 ไดโอด (Diode)	20
5.5 ทรานซิสเตอร์ (Transistors)	21
บทที่6 วงจรแปลงไฟ หรือวงจรเรกติไฟร์	26
บทที่7 การออกแบบฟีดเตอร์	34
บทที่8 แอมพลิฟายเออร์ (Amplifier)	48
บทที่9 การแมทช์อิมพีแดนซ์	58
บทที่10 การออกแบบส่วนประกอบของวงจรบูสเตอร์	96
บทที่11 วงจรรวมและหลักการทำงานของบูสเตอร์	113
บทที่ 12 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	120
บรรณานุกรม	122
ประวัติผู้เขียน	123
ภาคผนวก	124



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 การส่งสัญญาณโทรทัศนจากเครื่องส่ง	5
รูปที่ 3.2 การส่งคลื่นวิทยุผ่านอากาศ	6
รูปที่ 3.3 คลื่นตรง และคลื่นที่สะท้อนจากผิวโลก	7
รูปที่ 3.4 สายอากาศภาครับของเครื่องรับโทรทัศน	7
รูปที่ 3.5 เส้นทางเดินของสัญญาณโทรทัศนจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับซึ่งมีหลายทิศทาง	8
รูปที่ 3.6 ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าบนสายอากาศ	9
รูปที่ 3.7 สายอากาศภายในบ้านและภายนอกบ้าน	9
รูปที่ 3.8 สายอากาศแบบยาก็	10
รูปที่ 4.1 บูสเตอร์แบ่งตามชนิดการใช้งาน	11
รูปที่ 4.2 การติดตั้งบูสเตอร์	12
รูปที่ 4.3 วงจรภายในบูสเตอร์	13
รูปที่ 5.1 การอ่านค่าความต้านทาน	15
รูปที่ 5.2 การอ่านค่าตัวเหนี่ยวนำ	18
รูปที่ 5.3 การอ่านค่าตัวเหนี่ยวนำ	19
รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะและสัญลักษณ์ของไดโอด	20
รูปที่ 5.5 แสดงการต่อไฟของไดโอด	20
รูปที่ 5.6 แสดงการต่อไฟของไดโอด	21
รูปที่ 5.7 แสดงสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 แบบ	21
รูปที่ 5.8 อธิบายทิศทางการไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิด	22
รูปที่ 5.9 สัญลักษณ์ ทรานซิสเตอร์	23
รูปที่ 5.10 สัญญาณเอาต์พุตที่ขั้ว E ( $i_e$ ) และที่ขั้ว C ( $i_c$ )	23
รูปที่ 5.11 สัญญาณเอาต์พุตที่ขั้ว E ( $i_e$ ) และที่ขั้ว C ( $i_c$ )	24
รูปที่ 5.12 แสดงการไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น	24
รูปที่ 5.13 แสดงการไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี	25
รูปที่ 5.14 แสดงการวัดทดสอบทรานซิสเตอร์และผลที่ได้	25

รูปที่ 6.1 วงจรพื้นฐานฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์	26
รูปที่ 6.2 ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ในระหว่างครึ่งคลื่นซิกบวก	26
รูปที่ 6.3 ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ในระหว่างครึ่งคลื่นซิกลบ	26
รูปที่ 6.4 การกำหนดทิศทางการไหลของกระแสโดยไดโอด	27
รูปที่ 6.5 วงจรฟูลเวฟ เรกติไฟร์พื้นฐาน	27
รูปที่ 6.6 วงจรฟูลเวฟ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซิกบวก	28
รูปที่ 6.7 ฟูลเวฟ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซิกลบ	28
รูปที่ 6.8 แสดงวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์	28
รูปที่ 6.9 บริดจ์ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซิกบวก	29
รูปที่ 6.10 บริดจ์ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซิกลบ	30
รูปที่ 6.11 วงจรฟิวเตอร์เมื่อใช้คาปาซิเตอร์	31
รูปที่ 6.12 แสดงแรงดันเอาต์พุตของฮาล์ฟเวฟ	31
รูปที่ 6.13 ผลความแตกต่างของขนาดคาปาซิเตอร์ที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตในวงจรฮาล์ฟเวฟเรกติไฟร์	32
รูปที่ 6.14 ผลความแตกต่างของขนาดคาปาซิเตอร์ที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตในวงจรฟูลเวฟเรกติไฟร์และบริดจ์ เรกติไฟร์	32
รูปที่ 6.15 ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์	33
รูปที่ 6.16 บริดจ์ เรกติไฟร์ พร้อมกับคาปาซิเตอร์ ฟิวเตอร์	33
รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะของฟิวเตอร์ทั้ง 4 ชนิด	34
รูปที่ 7.2 วงจร low-pass filter สำหรับตัวอย่างที่ 7.1	36
รูปที่ 7.3 วงจรมูลฐานของ lowpass สำหรับตัวอย่าง 7.2	39
รูปที่ 7.4 วงจรมูลฐานของ lowpass สำหรับตัวอย่าง 7.2	39
รูปที่ 7.5 การออกแบบ high pass filter สำหรับตัวอย่าง 3.2	40
รูปที่ 7.6 การแปลง low-pass ไปเป็น band reject filter	46
รูปที่ 7.7 การออกแบบ Band pass filter สำหรับตัวอย่างที่ 7.4	47
รูปที่ 7.8 แสดงผลขององค์ประกอบที่มีการจำกัดค่า Q ในการตอบสนองของ filter	47
รูปที่ 8.1 การวัดอัตราขยาย	48
รูปที่ 8.2 วงจรขยายแบบคอมมอน เบส(Common base)	49
รูปที่ 8.3 วงจรขยายแบบคอมมอน อิมิตเตอร์( common emitter)	49

รูปที่ 8.4 วงจรขยายแบบคอมมอน คอลเล็กเตอร์(Common collector)	50
รูปที่ 8.5 คุณสมบัติของวงจรขยาย	50
รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ของเฟสอินพุท-เอาต์พุท ของวงจรขยาย	50
รูปที่ 8.7 วงจรขยายแบบคอมมอนอิมิตเตอร์พร้อมกับแหล่งจ่ายแรงดันเดี่ยว	51
รูปที่ 8.8 แสดงไดอะแกรมของวงจรขยายคอมมอนอิมิตเตอร์พร้อมกับแหล่งจ่ายแรงดันเดี่ยว	51
รูปที่ 8.9 วงจรขยายคอมมอน-อิมิตเตอร์ พร้อมกับคอลเล็กเตอร์ฟีดแบค	53
รูปที่ 8.10 วงจรขยายแบบคอมมอน อิมิตเตอร์ พร้อมกับอิมิตเตอร์ฟีดแบค	53
รูปที่ 8.11 อิมิตเตอร์ ฟีดแบค พร้อมกับบายพาส คาปาซิเตอร์	54
รูปที่ 8.12 วงจรขยายคอมมอน อิมิตเตอร์ พร้อมกับการฟีดแบคแบบแบ่งแรงดัน	55
รูปที่ 8.13 แรงดันเอาต์พุทของ คลาส เอ แอมพลิไฟร์( class A amplifier)	55
รูปที่ 8.14 แรงดันเอาต์พุทของคลาส เอบี แอมพลิไฟร์(class AB amplifier)	55
รูปที่ 8.15 แรงดันเอาต์พุทของคลาส บี แอมพลิไฟร์(class B amplifier)	56
รูปที่ 8.16 แรงดันเอาต์พุทของคลาส ซี แอมพลิไฟร์(class C amplifier)	56
รูปที่ 8.17 การต่อวงจรแบบพุช-พูล	57
รูปที่ 9.1 โครงข่ายชนิด L	58
รูปที่ 9.2 รูปการออกแบบโดยใช้เนตเวิร์คชนิดแอล	59
รูปที่ 9.3 วงจรสุดท้ายที่ได้	60
รูปที่ 9.4 วงจรของแหล่งกำเนิดเชิงซ้อนและโหลดสำหรับตัวอย่าง 2	60
รูปที่ 9.5 วงจรสุดท้ายในการออกแบบสำหรับ ตัวอย่าง 2	61
รูปที่ 9.6 วงจรโหลดเชิงซ้อน สำหรับตัวอย่าง3	62
รูปที่ 9.7 การพ้องของโหลดที่มีความเก็บประจุเกินมา	62
รูปที่ 9.8 วงจรรูป 9.6 หลังการทำการแมทช์อิมพีแดนซ์	63
รูปที่ 9.9 วงจรสุดท้ายสำหรับตัวอย่าง 3	64
รูปที่ 9.10 โครงข่าย 3 องค์ประกอบแบบไฟ	64
รูปที่ 9.11 โครงข่าย 3 องค์ประกอบแบบที	64
รูปที่ 9.12 แผนภูมิสมิทพื้นฐาน	66
รูปที่ 9.13 การพล็อตอิมพีแดนซ์บนสมิทชาร์ท	67
รูปที่ 9.14 การเพิ่มตัวเก็บประจุแบบอนุกรมบนสมิทชาร์ท	68
รูปที่ 9.15 การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมบนสมิทชาร์ท	69

รูปที่ 9.16 วงจรแทนค่าแอดมิตแตนซ์	71
รูปที่ 9.17 การแปลงอิมพีแดนซ์-แอดมิตแตนซ์ บนแผนภูมิสมิท	73
รูปที่ 9.18 การกำหนดพิกัดค่าแอดมิตแตนซ์	74
รูปที่ 9.19 การเพิ่มตัวเก็บประจุแบบขนาน	75
รูปที่ 9.20 การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน	76
รูปที่ 9.21 สรุปการเพิ่มองค์ประกอบบนแผนภูมิสมิท	77
รูปที่ 9.22 สำหรับตัวอย่าง 4	78
รูปที่ 9.23 การแบ่งวงจรออกเป็นแต่ละองค์ประกอบ	78
รูปที่ 9.24 แสดงวิธีทำโดยใช้แผนภูมิสมิท สำหรับตัวอย่าง 4	79
รูปที่ 9.25 วงจรสุดท้ายสำหรับตัวอย่าง 5	81
รูปที่ 9.26 แสดงวิธีทำของตัวอย่าง 5	81
รูปที่ 9.27 รูปแบบวงจร Amplifier Class A	82
รูปที่ 9.28 วงจร Amplifier Class A ที่ออกแบบ	83
รูปที่ 9.29 รูปแบบวงจรแมตซ์	84
รูปที่ 9.30 วงจร Amplifier Class A ที่ความถี่ 600MHz ที่ได้จากการออกแบบ	88
รูปที่ 9.31 รูปแบบวงจร Matching 2 state ความถี่ 600MHz	89
รูปที่ 9.32 วงจรแมตซ์ 2 State ที่ความถี่ 600 MHz ที่ได้จากการออกแบบ	95
รูปที่ 10.1 วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 30-70 MHz	97
รูปที่ 10.2 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 30-70 MHz	97
รูปที่ 10.3 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอด ย่าน 30-70 MHz	97
รูปที่ 10.4 วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ 250 MHz	99
รูปที่ 10.5 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ 250 MHz	99
รูปที่ 10.6 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ 250 MHz	99
รูปที่ 10.7 วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 160-230 MHz	101
รูปที่ 10.8 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 160-230 MHz	101
รูปที่ 10.9 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอด ย่าน 160-230 MHz	101
รูปที่ 10.10 วงจรกรองความถี่ผ่านสูง 300 MHz	103

รูปที่ 10.11 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 300 MHz	103
รูปที่ 10.12 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 300 MHz	103
รูปที่ 10.13 วงจรกรองความถี่ผ่านสูง 400 MHz	105
รูปที่ 10.14 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 400 MHz	105
รูปที่ 10.15 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 400 MHz	105
รูปที่ 10.16 วงจรขยายย่านความถี่ VHF โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2sc3355	107
รูปที่ 10.17 การตอบสนองของวงจรขยายย่านความถี่ VHF จากเครื่อง Network Analysis	108
รูปที่ 10.18 วงจรขยายย่านความถี่ UHF โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2sc3355	110
รูปที่ 10.19 การตอบสนองของวงจรขยายย่านความถี่ UHF จากเครื่อง Spectrum Analyzer	111
รูปที่ 11.1 ภาพวงจรสำเร็จของวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง	113
รูปที่ 11.2 ภาพวงจรรวมของวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง	115
รูปที่ 11.3 ภาพการตอบสนองของวงจรขยายสัญญาณรวมวัดจากเครื่อง Spectrum Analyzer	119

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งย่านความถี่ในลักษณะต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน	3
ตารางที่ 2.2 แสดงการแบ่งแถบคลื่นความถี่การใช้งานโทรทัศน์ในประเทศไทย	4
ตารางที่ 5.1 ตารางเทียบคุณสมบัติของตัวต้านทานแบบต่าง ๆ	16
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบการใช้งานของตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ	17
ตารางที่ 7.1A. Chebyshev Low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.1-dB Ripple	37
ตารางที่ 7.1B. Chebyshev low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.1-dB Ripple	38
ตารางที่ 7.2A Chebyshev Low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.5-dB Ripple	40
ตารางที่ 7.2B Chebyshev Low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.5-dB Ripple	41
ตารางที่ 7.3A Chebyshev Low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 1.0-dB Ripple	43
ตารางที่ 7.3B Chebyshev Low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 1.0-dB Ripple	44

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาของโครงการ

ปัจจุบันนี้ข่าวสารที่ทันสมัย ต่อเหตุการณ์ของโลก มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และความบันเทิงทุกรูปแบบสามารถนำเสนอได้ถึงภายในบ้าน โดยผ่านเครื่องรับโทรทัศน์ซึ่งเผยแพร่ได้ทั้งภาพและเสียง ที่สามารถนำเหตุการณ์ จากทั่วทุกมุมโลก แม้จากนอกโลกมาให้ฟังและเห็นพร้อมๆกัน ดังนั้นเราจึงต้องมีการพัฒนาระบบการส่งโทรทัศน์ รวมถึงอุปกรณ์สนับสนุนเพื่อให้การส่งโทรทัศน์ มีประสิทธิภาพในระยะที่เพิ่มขึ้น

สถานีส่งจะส่งสัญญาณโทรทัศน์ เข้าไปยังชั้นบรรยากาศโดยมีคลื่นวิทยุเป็นพาห้นำสัญญาณดังกล่าวไปยังสายอากาศภาครับ จนกระทั่งถึงเครื่องรับโทรทัศน์ ในขณะที่สถานีโทรทัศน์ทำการแพร่ภาพออกอากาศอยู่ เครื่องรับในจังหวัดที่ห่างไกลออกไป หรือแถบชนเมือง จะประสบปัญหาอยู่บ่อยครั้งคือ ไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรงหรือมีความเข้มของสัญญาณต่ำ แต่ก็มีความต้องการที่จะรับสัญญาณให้ได้ชัดเจน และในเวลาพร้อมกับเครื่องรับในเมืองใหญ่ เนื่องด้วยระยะทางที่ไกลกว่าทำให้สัญญาณโทรทัศน์ที่เดินทางมายังสายอากาศภาครับลดความแรงลง ดังนั้นสามารถทำการแก้ไขโดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณโทรทัศน์แบบกว้าง (Booster) เพื่อทำให้สัญญาณมีความเข้มข้น บุสเตอร์จะติดตั้งที่สายอากาศภายนอกบ้าน เพื่อรับสัญญาณโทรทัศน์จากแผงรับสัญญาณ เข้าสู่วงจรบัสเตอร์ และมีขับปลายคอยจ่ายกระแสเข้าไปไบแอสทรานซิสเตอร์ในวงจร โดยการทำงานของบัสเตอร์ จะรับสัญญาณโทรทัศน์จากแผงรับสัญญาณ เข้าสู่อินพุตของบัสเตอร์ ผ่านกระบวนการกรองความถี่โดยฟิวเตอร์ ให้ได้ความถี่ที่ต้องการในย่าน LF, VHF และ UHF แล้วทำการขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ ให้มีความแรงเพิ่มขึ้น และส่งสัญญาณไปยังเสาที่พุดผ่านสายนำสัญญาณ เพื่อส่งต่อไปที่เครื่องรับโทรทัศน์จะได้สัญญาณภาพและเสียงที่คมชัดมากขึ้น ช่วยเพิ่มอัตราสในการรับชมให้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นการที่จะขยายสัญญาณโทรทัศน์ให้มีความแรงมากขึ้น สามารถใช้วงจรขยายสัญญาณแบบกว้าง ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานตามบ้านเรือน และอาคารขนาดเล็ก รวมถึงสามารถนำความรู้ที่ได้รับจากวงจรต้นแบบไปประยุกต์ใช้กับ วงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆที่มีความซับซ้อนมากกว่าได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและนำความรู้ทางด้าน RF Circuit และอิเล็กทรอนิกส์ มาประยุกต์ใช้งานจริงในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง
- 1.2.2 เพื่อเรียนรู้การเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆให้เหมาะสมกับการใช้งาน
- 1.2.3 เพื่อเรียนรู้ขั้นตอนในการทำวงจรแบบต่างๆ
- 1.2.4 เพื่อเรียนรู้วิธีการวัดผลจากเครื่องมือวัดประเภทต่างๆ ตามการใช้งาน
- 1.2.5 เพื่อเรียนรู้หลักการทำงานของวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้างได้
- 1.2.6 เพื่อสามารถวิเคราะห์ผลการทดลอง และหาแนวทางการแก้ไข

## 1.3 ขอบข่ายของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบของวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง
- 1.3.2 ทำการออกแบบองค์ประกอบต่างๆในวงจรจากการคำนวณทางทฤษฎี และการใช้โปรแกรมคำนวณ
- 1.3.3 จัดทำองค์ประกอบต่างๆของวงจรที่ทำกรออกแบบไว้
- 1.3.4 ทำการทดสอบผลตอบแทนของวงจร โดยใช้เครื่องวัดสัญญาณ และปรับปรุงแก้ไขตามความเหมาะสม
- 1.3.5 นำส่วนประกอบต่างๆมาประกอบขึ้นเป็นวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง แล้วทำการทดสอบและแก้ไขข้อผิดพลาด

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้นำความรู้ที่ได้จากการศึกษาทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้งานได้จริง
- 1.4.2 ได้เรียนรู้การเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสม
- 1.4.3 ได้เรียนรู้และฝึกทักษะ การใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มาประกอบขึ้นเป็นวงจร
- 1.4.4 ได้เรียนรู้วิธีการวัดสัญญาณ และใช้เครื่องมือวัดสัญญาณให้เหมาะสมกับการใช้งาน
- 1.4.5 ได้เรียนรู้หลักการทำงานในวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง และองค์ประกอบภายในวงจร



## บทที่ 2

### ระบบโทรทัศน์และการแบ่งย่านความถี่ในประเทศไทย

นับตั้งแต่มีการส่งกระจายสัญญาณภาพโทรทัศน์เกิดขึ้น ได้มีการกำหนดมาตรฐานของระบบโทรทัศน์ในแต่ละประเทศโดยสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศหรือที่เรียกว่า ITU (International Telecommunication Union) เพื่อป้องกันการส่งสัญญาณของประเทศต่างๆ ไม่ให้เกิดการรบกวนกัน สำหรับในประเทศไทยจะเป็นการใช้ระบบโทรทัศน์แบบ 6.5 เส้น/ภาพ 25 ภาพ/วินาที สถานีส่งโทรทัศน์ทั้งหมดตามมาตรฐาน CCIR และส่งออกอากาศเป็นโทรทัศน์สีแบบ PALB

การแบ่งย่านความถี่ ความถี่การใช้งานโทรทัศน์กำหนดไว้ถึง 2 ย่านคือ ย่าน VHF และ UHF แต่เดิมการใช้งานโทรทัศน์ทั่วไปจะใช้งานในย่านความถี่ VHF แต่ในปัจจุบันนี้การใช้งานในย่านความถี่ VHF ถูกใช้จนเต็มที่แล้ว จึงได้นำความถี่ย่าน UHF มาใช้งานแทน รวมถึงในการใช้งานต่อไปในอนาคตด้วย

#### ตารางที่ 2.1 การแบ่งย่านความถี่ในลักษณะต่างๆ ตามลักษณะการใช้งาน

ย่านความถี่	ความถี่	ความยาวคลื่น	การใช้งาน
Very Low Frequency (VLF)	ต่ำกว่า 30 kHz	> 10 km	โทรเลข โซนาร์
Low Frequency (LF)	30-300 kHz	1-10 km	โทรพิมพ์,วิทยุเรือ
Medium Frequency (MF)	300-3000 kHz	> 100-1000 m	วิทยุ AM
High Frequency(HF)	3-30 MHz	> 10-100 m	วิทยุสื่อสาร, CB
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz	1-10 m	โทรทัศน์,วิทยุ FM
Ultra High Frequency (UHF)	300-3000 MHz	> 10-100 cm	โทรทัศน์,การบิน
Super High Frequency (SHF)	3-30 GHz	1-10 cm	ไมโครเวฟ, ดาวเทียม
Extremely High Frequency (EHF)	30-300 GHz	1-10 mm	การสื่อสารใยแสง

ในประเทศไทยมีการส่งโทรทัศน์ ในย่านความถี่ VHF และ UHF

-ในระบบ VHF (ย่านความถี่ 30 ถึง 300 MHz) มีทั้งหมด 5 ช่อง คือ ช่อง3 (เก่า) ช่อง5 ช่อง7 ช่อง9 และช่อง11

-ในระบบ UHF (ย่านความถี่ 400ถึง 900 MHz) มีทั้งหมด 2ช่อง คือ ช่อง3 (ใหม่) และช่องไอทีวี

มีสถานีส่งโทรทัศน์หลัก 6 สถานี ที่มีแม่ข่ายอยู่ในกรุงเทพมหานคร และมีสถานีเครือข่ายอยู่ตามจังหวัดทั่วประเทศ แต่ละสถานีจะมีช่วงกว้างความถี่ 7 MHz ซึ่งใช้ช่องต่างๆดังนี้

-สถานีวิทยุโทรทัศน์ไทยทีวีสีช่อง 3 อ.ส.ม.ท. ความถี่ VHF 54-61 MHz (เก่า) ซึ่งในปัจจุบันช่อง 3 ได้มีการส่ง สัญญาณโทรทัศน์ในระบบ UHF 558-566 MHz เพื่อความคมชัดของภาพและเสียงที่ดีขึ้น

-สถานีวิทยุโทรทัศน์กองทัพบกช่อง 5 ความถี่ VHF 174-181 MHz

-สถานีโทรทัศน์สีกองทัพบกช่อง 7 ความถี่ VHF 188-195 MHz

-สถานีวิทยุโทรทัศน์ไทยทีวีสีช่อง 9 อ.ส.ม.ท. ความถี่ VHF 202-209 MHz

-สถานีวิทยุโทรทัศน์แห่งประเทศไทยช่อง 11 ความถี่ VHF 216-223 MHz

-สถานีวิทยุโทรทัศน์ไอทีวีความถี่ UHF 534-542 MHz

สำหรับสถานีที่เป็นลูกข่ายที่ทำการถ่ายทอดจะมีกระจายอยู่ทั่วประเทศ ซึ่งออกอากาศในความถี่ที่แตกต่างกันออกไป ในแต่ละพื้นที่หนึ่งไม่ควรจะมีช่องโทรทัศน์ที่มีความถี่ติดกัน จะต้องส่งช่องเว้นช่อง เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนกันให้น้อยที่สุด

## ตารางที่ 2.2 แสดงการแบ่งแถบคลื่นความถี่การใช้งานโทรทัศน์ในประเทศไทย

แถบคลื่น	ช่องความถี่ใช้งาน	ย่านความถี่
VHF แบนด์ที่ 1	ช่อง 2-4	VHF 41-68 MHz
VHF แบนด์ที่ 2	สถานีวิทยุ FM	VHF 88-108 MHz
VHF แบนด์ที่ 3	ช่อง 5-12	VHF 174-230 MHz
UHF แบนด์ที่ 4	ช่อง 21-37	UHF 470-582 MHz
UHF แบนด์ที่ 5	ช่อง 38-69	UHF 606-890 MHz

ในส่วนการออกแบบวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง จะใช้ฟิวเตอร์เพื่อกรองสัญญาณความถี่ที่จะนำไปใช้งานตามย่านความถี่ดังนี้

-ย่านความถี่ 40-60 MHz (VHF แบนด์ที่ 1) เพื่อกรองสัญญาณความถี่โทรทัศน์ ช่อง 3 (เก่า)

-ย่านความถี่ 170-230 MHz (VHF แบนด์ที่ 3) เพื่อกรองสัญญาณความถี่โทรทัศน์ ช่อง 5, ช่อง 7, ช่อง 9 และ ช่อง 11

-ย่านความถี่ 470-582 MHz (UHF แบนด์ที่ 4) เพื่อกรองสัญญาณความถี่โทรทัศน์ ช่อง 3 (ใหม่), ช่อง ITV

ดังแสดงการออกแบบวงจรในบทต่อไป

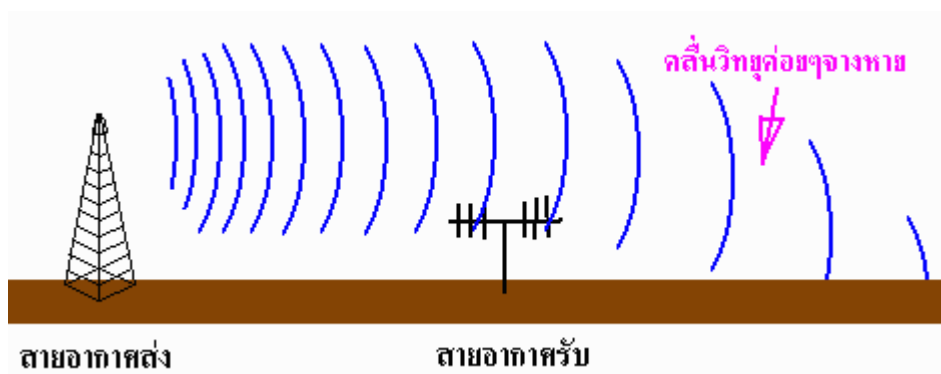
### บทที่ 3

#### หลักการเบื้องต้นของการส่งโทรทัศน์

ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์นั้น ข่าวสาร เหตุการณ์หรือภาพต่างๆ จะถูกส่งออกไปในอากาศในรูปคลื่นพาห้วิทยุ(Radio carrier wave) ในระบบโทรทัศน์ภาพซึ่งเป็นสัญญาณทางแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อส่งออกไปยังจุดที่ห่างไกล จากนั้นทางเครื่องรับจะเปลี่ยนให้กลับมาเป็นสัญญาณทางแสงเหมือนเดิม สำหรับการส่งโทรทัศน์นอกจากสัญญาณแสงแล้วยังรวมถึงการส่งสัญญาณเสียง เช่น คำพูดหรือดนตรีไปพร้อมกันอีกด้วย จึงทำให้การส่งสัญญาณโทรทัศน์มีความซับซ้อนขึ้นมาอีก

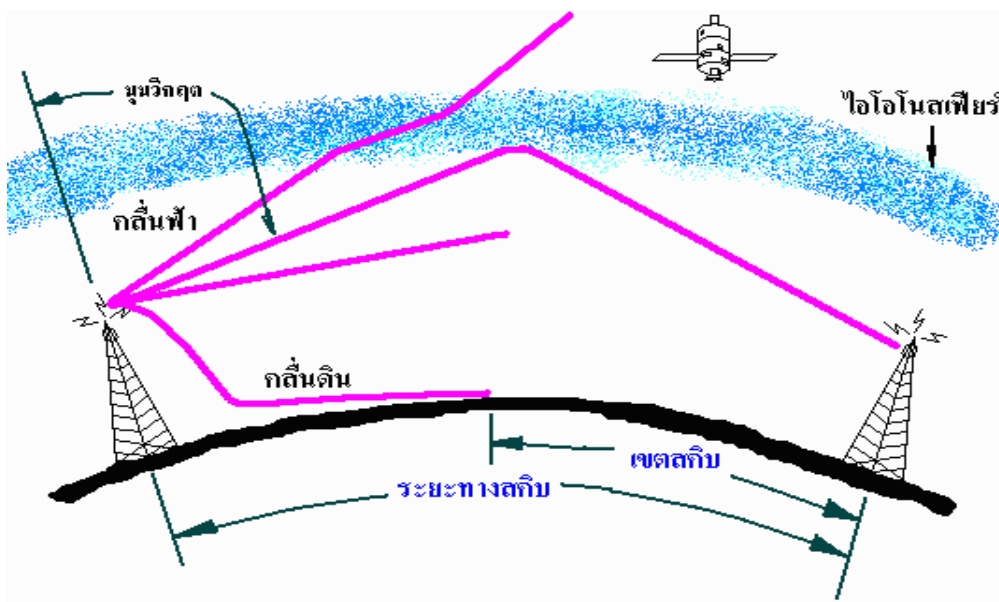
สัญญาณเสียงซึ่งเกิดจากการสั่นของอากาศ ถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้ไมโครโฟน ส่วนสัญญาณภาพซึ่งเป็นสัญญาณแสง ถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้กล้องโทรทัศน์ แต่ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากสัญญาณเสียงและภาพนั้น อยู่ในย่านความถี่ต่ำ เช่น ของเสียง 20 Hz ถึง 15 KHz ส่วนของภาพ 0 Hz ถึง 5 MHz ซึ่งก็ยังไม่เหมาะสำหรับการส่งโดยตรงออกไปในอากาศ นอกจากนั้นจะต้องคำนึงถึงว่า ถ้ามีการส่งสัญญาณดังกล่าวนี้จากที่ต่างๆ ในเวลาเดียวกัน ทางด้านเครื่องรับต้องสามารถที่จะเลือกรับเอาเฉพาะสัญญาณที่ต้องการ โดยไม่ให้สัญญาณอื่นเข้ารบกวน แต่สัญญาณต่างๆ ดังกล่าว มีความถี่อยู่ในย่านเดียวกัน จึงเป็นการยากสำหรับเครื่องรับที่จะแยกสัญญาณต่างๆ ไม่ให้กวนกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีการกำหนดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งมีความถี่เหมาะสมสำหรับการส่งออกไปในอากาศขึ้นมาหลายๆ ความถี่ เรียกว่าความถี่คลื่นวิทยุ ใช้สำหรับเป็นคลื่นพาห้(Carrier wave) หรือเป็นตัวนำบรรทุกเอาสัญญาณใด สัญญาณหนึ่งไป การบรรทุกสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งไปจะกระทำโดยใช้วิธีการมอดูเลชัน( Modulation)

#### การส่งสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับโทรทัศน์



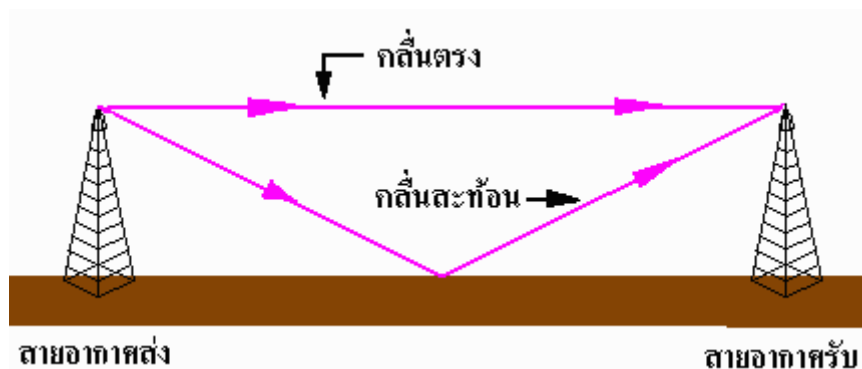
รูปที่ 3.1 การส่งสัญญาณโทรทัศน์จากเครื่องส่ง

การที่ผู้ฟังหรือผู้ชมรายการโทรทัศน์จะรับสัญญาณที่เป็นเหตุการณ์ ไม่ว่าจะเกิดขึ้นมา ณ. ที่ใด สถานที่ใด ได้อย่างชัดเจน นั้น กรรมวิธีในการส่งสัญญาณย่อมมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก ยกตัวอย่างเช่น เครื่องรับวิทยุโทรทัศน์ที่อยู่ในเมืองใหญ่ ซึ่งมีสถานีโทรทัศน์ทำการแพร่ภาพออกอากาศอยู่ กับเครื่องรับในจังหวัดที่ห่างไกลออกไปซึ่งไม่สามารถรับสัญญาณได้โดยตรงจากสถานีดังกล่าวนี้ได้ แต่ก็มีความต้องการรับสัญญาณให้ได้ชัดเจนและในเวลาเดียวพร้อมกับเครื่องรับในเมืองใหญ่ ระบบหรือวิธีที่ใช้ในปัจจุบันก็คือการถ่ายทอดสัญญาณเป็นระยะๆ กล้องถ่ายภาพโทรทัศน์จะถ่ายภาพในขณะที่ไมโครโฟนจะรับเสียง สัญญาณไฟฟ้าทั้งสองนี้จะถูกส่งไปยังสถานีโทรทัศน์ หรือศูนย์ควบคุมการแพร่ภาพ โดยจะผ่านอุปกรณ์เครื่องส่งและรับไมโครเวฟ หลังจากที่ศูนย์ควบคุมทำการจัดแต่งสัญญาณจนสมบูรณ์แล้ว สัญญาณก็จะถูกส่งไปยังตัวเครื่องส่งซึ่งอยู่ ณ. ที่อีกแห่งหนึ่งด้วยระบบไมโครเวฟอีกครั้ง หลังจากนั้นเครื่องส่งโทรทัศน์ก็จะทำการแพร่ภาพและเสียงออกไปทางสายอากาศส่งในรูปแบบคลื่นวิทยุ โดยอาศัยสมบัติการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟีย การเดินทางผ่านอากาศโดยใช้คลื่นวิทยุเป็นพาหื่อนี้ เดินทางด้วยความเร็ว 300,000,000 เมตรต่อวินาที และเคลื่อนที่ออกไปในทุกทิศทางเป็นเส้นตรง คลื่นวิทยุที่กระจายอยู่ในบรรยากาศต่างๆนี้จะ เรียกว่าคลื่นในท้องฟ้า(Sky waves) บางคลื่นจะสะท้อนกลับมายังพื้นโลก และบางคลื่นก็เดินทางทะลุชั้นไอโอโนสเฟียออกไป คลื่นวิทยุที่ยังเหลืออยู่บริเวณพื้นผิวโลก เรียกว่าคลื่นพื้นดิน (Ground waves) ดังรูปที่3.2



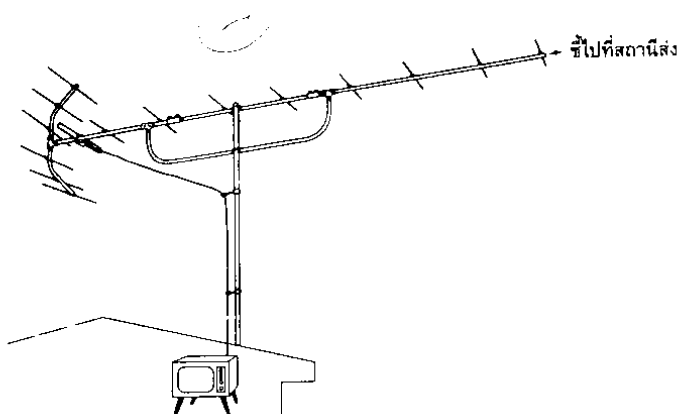
รูปที่ 3.2 การส่งคลื่นวิทยุผ่านอากาศ

คลื่นพื้นดินจะประกอบด้วยคลื่น 3 ลักษณะคือ คลื่นที่เคลื่อนที่ออกไปตรงๆ(Direct Wave), คลื่นที่ผิว (Surface Wave) และคลื่นสะท้อน (Reflected Wave) ดังรูปที่ 3.3 ดังนั้นจึงต้องใช้เสาอากาศที่สูงพอที่จะรับคลื่นเหล่านี้ได้



รูปที่ 3.3 คลื่นตรง และคลื่นที่สะท้อนจากผิวโลก

เมื่อสัญญาณคลื่นวิทยุจะถูกส่งมายังเสาอากาศภาครับของเครื่องรับโทรทัศน์ ผ่านกระบวนการโวลตาไรซ์สัญญาณในการรับของเสาอากาศ โดยเสาอากาศจะทำหน้าที่รับคลื่นวิทยุซึ่งเป็นพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 3.4 โดยจะทำการเปลี่ยนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นพลังงานไฟฟ้าความถี่สูงเข้าไปในจูนเนอร์ของเครื่องรับโทรทัศน์ และเข้าสู่ระบบการทำงานของเครื่องรับโทรทัศน์ต่อไป

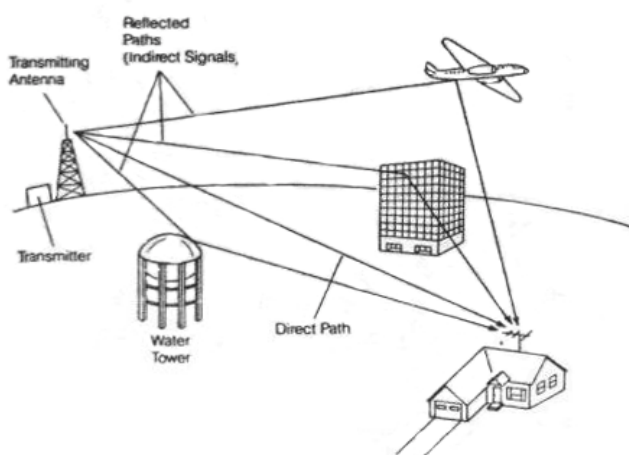


รูปที่ 3.4 เสาอากาศภาครับของเครื่องรับโทรทัศน์

### ความแรงของสัญญาณ

ความแรงของสัญญาณโทรทัศน์นั้นประกอบด้วยการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งความแรงของสัญญาณนั้นจะถูกแสดงในเทอมความแรงของสนามไฟฟ้า โดยมันจะถูกวัดค่าแรงดันของสนามไฟฟ้าที่โวลต์ที่ถูกเหนี่ยวนำที่สายอากาศ ถ้าสายอากาศรับอยู่ใกล้เครื่องส่งมันจะวัดเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m) ถ้าระยะไกลออกไปจะวัดได้แค่มิลลิโวลต์ต่อเมตร (mV/m) หรือไมโครโวลต์ต่อเมตร ( $\mu\text{V/m}$ )

ความแรงของสัญญาณที่ได้รับนั้นขึ้นกับ กำลังของการส่งอัตราขยายของสายอากาศส่ง ระยะทางจากเครื่องส่งถึงเครื่องรับและทางเดินของสัญญาณ ซึ่งทางเดินนั้นก็ยังมีหลายทางคือ พื้นดินโดยตรง การสะท้อนหรือการหักเหคลื่นบนท้องฟ้า ซึ่งได้กล่าวถึงอย่างละเอียดแล้วในตอนต้น

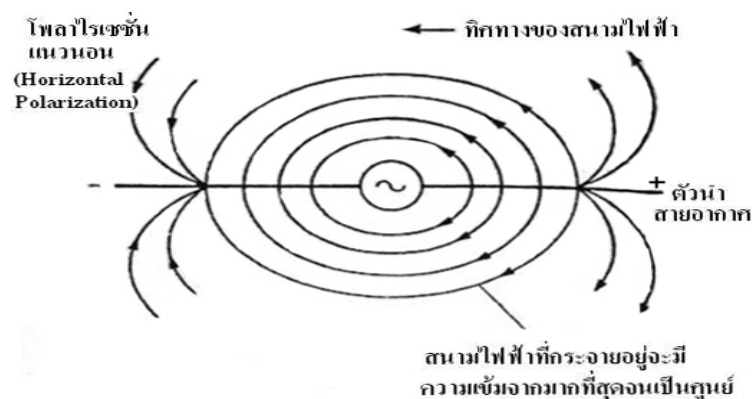


รูปที่ 3.5 เส้นทางเดินของสัญญาณโทรทัศน์จากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับซึ่งมีหลายทิศทาง

### การโพลาไรเซชัน (Polarization) ของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงให้เห็นสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (H) ที่ถูกสร้างขึ้นโดยสายอากาศ ทิศทางของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก จะเรียกว่า โพลาไรเซชัน โดยที่เราจะสนใจโพลาไรเซชันของสนามใดสนามหนึ่งเท่านั้น แต่ในความหมายของคำว่า โพลาไรเซชันของสายอากาศ จะหมายถึง ทิศทางของสนามไฟฟ้าเท่านั้น บางครั้งอาจได้ยินคำว่าขั้วสนามไฟฟ้า ซึ่งก็มีความหมายเช่นเดียวกัน

ความสำคัญของโพลาไรเซชันก็คือ ในการติดตั้งสายอากาศทั้งรับและส่งจะต้องมีทิศทางของสนามเหมือนกันจึงจะรับส่งกันได้ เช่น สายอากาศส่งให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวตั้ง (Vertical Polarization) สายอากาศรับต้องเป็นแบบเดียวกันด้วย หากเป็นแบบแนวนอน (Horizontal Polarization) ก็จะรับคลื่นที่ส่งมาไม่ได้เลย สำหรับสายอากาศ FM หรือ TV จะมีมาตรฐานเป็นแบบแนวนอน (Horizontal) ซึ่งจะรับคลื่นได้โดยปราศจากการรบกวนของสนามในแนวตั้ง ซึ่งมนุษย์ชอบสร้างขึ้นมาเสมอ



รูปที่ 3.6 ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าบนสายอากาศ

การกระจายคลื่นโพลาไรเซชันแนวงกลม

เนื่องมาจากความนิยมในการใช้บริการการกระจายคลื่นวิทยุย่าน FM และการกระจายคลื่นทาง TV ทาง FCC จึงอยากจะทำให้การรับคลื่นเป็นไปได้ง่ายขึ้น จึงทำให้การส่งแบบวงกลม โดยเอา 2 แกนมารวมกัน แล้วส่งออกไป ทำให้สนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็ก จะเคลื่อนที่อยู่ในลักษณะหมุนอยู่ในอวกาศตลอดเวลา นอกจากการส่งแบบนี้จะทำให้การรับคลื่นง่ายขึ้นแล้ว ยังลดความน่ากลัวที่มาจากคลื่นสะท้อนกลับ (Reflect Wave) เพราะเมื่อสนามมีการหมุนผลรวมของคลื่นที่ส่งไป และสะท้อนกลับจะหักล้างกันพอดีทำให้ไม่ต้องกลัวอันตรายที่จะเกิดกับเครื่องส่งที่มาจากคลื่นสะท้อนอีกต่อไป

ในการใช้งานสายอากาศมีทั้งแบบภายในบ้านและนอกบ้านดังรูปที่ 3.6 แต่ในที่นี้จะเน้นที่สายอากาศภายนอกบ้าน ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิดแต่ชนิดที่นิยมใช้คือ สายอากาศแบบยาคี ที่มีประสิทธิภาพการใช้งานสูง



รูปที่ 3.7 สายอากาศภายในบ้านและภายนอกบ้าน

แผงรับสัญญาณแบบยาคิชนิดนี้ใช้กับเครื่องรับโทรทัศน์ทั้ง 2 ย่าน ความถี่ คือ แผงรับสัญญาณย่าน VHF และ UHF จะมีอัตราการขยายสูง และมีทิศทางการรับคลื่นรวมทั้งตัดสัญญาณรบกวนด้านหลังได้ เนื่องจากประกอบด้วยตัวป้อน(Exciter) ตัวสะท้อนคลื่น (Reflector) และตัวนำคลื่น(Director) ตัวสะท้อนจะทำหน้าที่สะท้อนคลื่นที่จะไปด้านหลังให้กลับมาด้านหน้า ตัวนำคลื่นจะนำคลื่นเข้าสู่ตัวป้อน จึงทำให้ตัวป้อนสามารถรับคลื่นได้แรงขึ้น ตัวป้อนนั้นจะทำหน้าที่รับคลื่นจากการสะท้อนและนำคลื่นดังกล่าวเหนี่ยวนำให้เกิด โวลเตจขึ้นที่ขั้วของตัวป้อน และโวลเตจจะถูกส่งเข้าสู่ระบบโดยผ่านสายนำสัญญาณเพื่อป้อนเข้าภาคขยายอาร์เอฟในจูนเนอร์ของเครื่องรับโทรทัศน์ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 สายอากาศแบบยาคิ

ในบางครั้ง ถ้าต้องการให้มีการขยายสัญญาณจากสายอากาศให้มากขึ้น ทำได้โดยการใช้ อุปกรณ์ขยายสัญญาณ หรือแอมพลิไฟเออร์ ซึ่งมีหลายอย่างด้วยกันเช่น แชนเนลแอมพลิไฟเออร์ (Channel Amplifier) มัลติแอมพลิไฟเออร์ (Multiband Amplifier) 프리แอมพลิไฟเออร์ (Pre-amplifier) และบูสเตอร์ (Booster) เป็นต้น สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมกับการใช้งานจริง



## บทที่ 4

### ทฤษฎีและการทำงานของบูสเตอร์ (Booster)

บูสเตอร์เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ หรือแอมพลิฟายเออร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ขยายความถี่ในช่วงกว้าง โดยทั่วไปมักออกแบบให้มีหลายขั้วอินพุตแยกตามแบนด์ต่างๆ เหมาะกับการใช้ขยายสัญญาณที่มีความเข้มต่ำแถบชนเมือง ใช้งานตามบ้าน หรืออาคารขนาดเล็ก

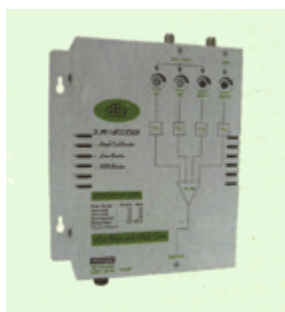
บูสเตอร์สายอากาศ (Antenna booster) คือตัวขยายสัญญาณอาร์เอฟแบนด์กว้างย่าน VHF ครอบคลุมความถี่ของโทรทัศน์แบนด์ I (ช่อง 2-4) แบนด์ II วิทยู FM และโทรทัศน์ แบนด์ III (ช่อง 5-12) หรือย่าน UHF ช่อง 21-69 การใช้งานบูสเตอร์จะถูกต่อไว้กับสายนำสัญญาณที่มาจากแผงรับสัญญาณโทรทัศน์ เพื่อขยายคลื่นโทรทัศน์กำลังอ่อนๆ ให้มีความแรงสูงขึ้น บูสเตอร์สายอากาศมี 3 แบบแบ่งตามชนิดการใช้งานคือ แบบติดตั้งภายนอกบ้าน แบบติดตั้งไว้ภายในบ้าน และแบบติดตั้งระบบที่วิรวมตามอาคาร ดังรูปที่ 4.1



แบบติดตั้งภายนอกบ้าน



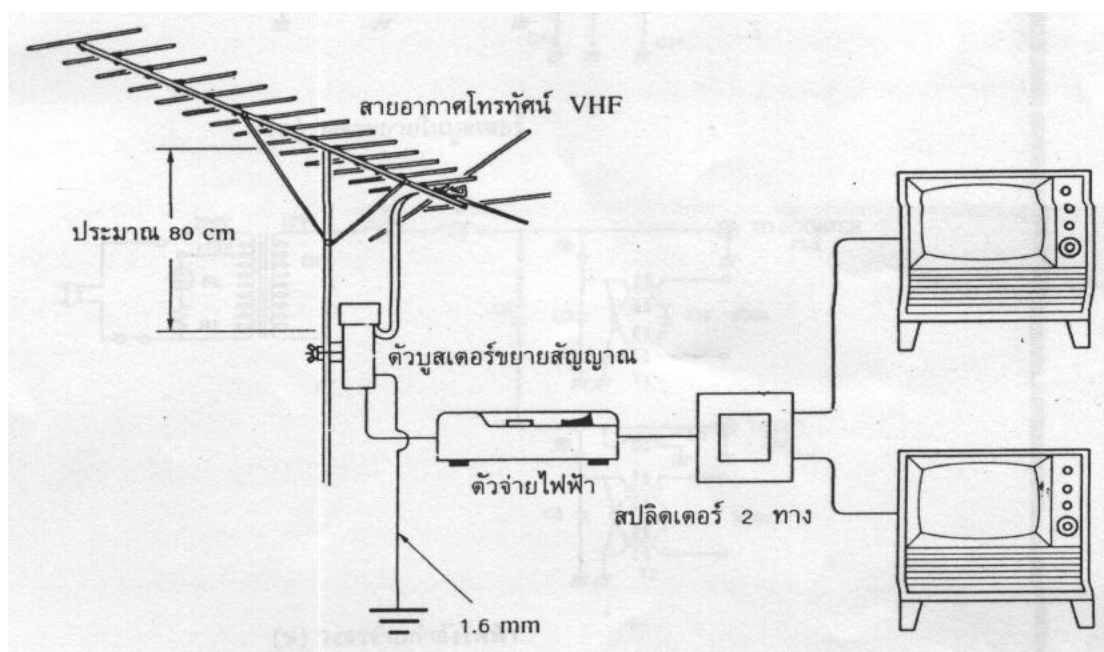
แบบติดตั้งไว้ภายในบ้าน



แบบติดตั้งระบบที่วิรวมตามอาคาร

รูปที่ 4.1 บูสเตอร์แบ่งตามชนิดการใช้งาน

ในบทนี้จะกล่าวเน้นถึงบูสเตอร์สายอากาศแบบที่ติดตั้งภายนอกบ้าน ซึ่งชุดหนึ่งจะมี 2 ตัว ซึ่งจะประกอบด้วยตัวบูสเตอร์ขยายสัญญาณกับตัวจ่ายไฟเพาเวอร์ซัพพลาย ตัวขยายสัญญาณจะถูกติดตั้งไว้บนเสาโกลั๊ๆ กับแผงรับสัญญาณห่างจากจุดป้อนสัญญาณของไดโพลประมาณ 20-100 cm แล้วต่อสายนำสัญญาณลงมาเข้าเพาเวอร์ซัพพลายข้างล่างซึ่งจะติดตั้งไว้ใกล้เครื่องรับโทรทัศน์ ประมาณ 30-50 cm ดังรูป 4.2 สายนำสัญญาณสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบ 75 โอห์ม หรือแบบ 300 โอห์ม โดยสายนำสัญญาณจะทำหน้าที่ 2 อย่างคือ อย่างแรกนำแรงดันไฟฟ้าสลับ จากเพาเวอร์ซัพพลายขึ้นไปเลี้ยงวงจรขยาย และอย่างที่สองเป็นตัวนำสัญญาณอาร์เอฟของคลื่นสัญญาณโทรทัศน์ที่ขยายแล้วลงมาเข้าเครื่องรับ

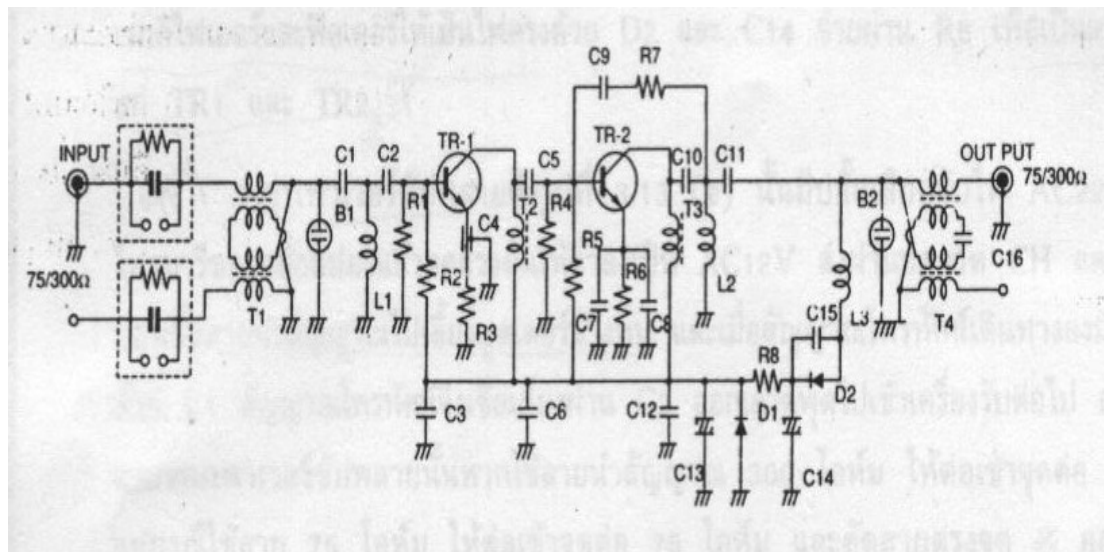


รูปที่ 4.2 การติดตั้งบูสเตอร์

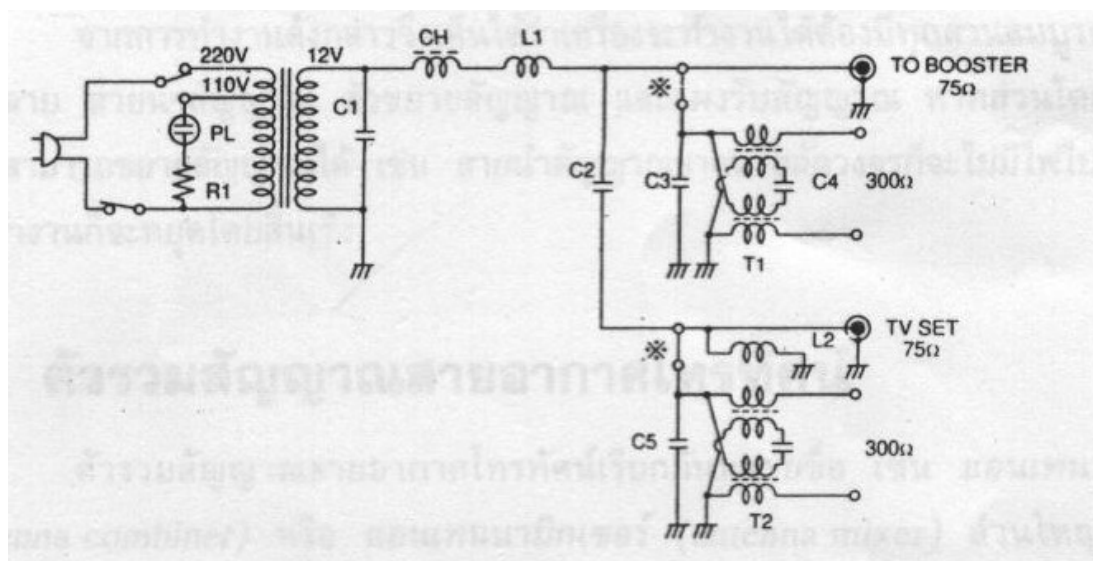
ความจำเป็นที่จะต้องใช้นูสเตอร์เมื่อเกิดกรณีต่อไปนี้

1. เครื่องรับอยู่ห่างสถานีส่งมีสัญญาณโทรทัศน์อ่อนมาก แก้ไขด้วยการติดตั้งแผงรับสัญญาณ ถึงที่สุดแล้วแต่สัญญาณยังไม่แรงพอจำเป็นต้องใช้นูสเตอร์ช่วยขยายเพิ่มเติม
2. เมื่อจำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณยาวมาก เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณตกที่ปลายสายจึงต้องขยายสัญญาณให้แรงขึ้นที่ต้นสาย
3. เมื่อมีการรบกวนในสายมาก การติดตั้งบูสเตอร์ที่ต้นสายจะทำให้สัญญาณโทรทัศน์ถูกขยาย ยกกระดับสูงกว่าสัญญาณรบกวน
4. เมื่อต้องแบ่งแยกสัญญาณโทรทัศน์ออกไปใช้กับเครื่องรับโทรทัศน์หลายๆเครื่อง

รูปที่ 4.3 แสดงวงจรภายในบูสเตอร์ โดยที่รูป (ก) แสดงวงจรของตัวขยายสัญญาณที่อยู่ข้างบนเสา ส่วนที่รูป (ข) แสดงวงจรของเพาเวอร์ซัพพลาย



(ก) วงจรขยายในบูสเตอร์



(ข) วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 4.3 วงจรภายในบูสเตอร์

### การทำงานของบูสเตอร์

การทำงานของวงจรในรูป(ก)ทางด้านอินพุตจะต่อกับสายนำสัญญาณไปเข้ากับไดโพลในแผงรับสัญญาณโทรทัศน์ ทางด้านเอาต์พุตจะต่อกับสายนำสัญญาณเพื่อไปเข้ากับเพาเวอร์ซัพพลาย มีจุดให้เลือกต่อสายนำสัญญาณได้ทั้งชนิด 75 โอห์ม และ 300 โอห์ม สัญญาณโทรทัศน์จากแผงรับสัญญาณจะป้อนเข้าวงจรบูสเตอร์ผ่านทางหม้อแปลงการแมทช์ T1 ผ่านวงจรแบนด์พาสฟิวเตอร์ C1, C2 และ L1 เพื่อกรองเฉพาะคลื่นอาร์เอฟที่อยู่ในย่าน VHF ให้เข้าไปขยายในทรานซิสเตอร์ TR1 ทางขาเบสขยายออกทางขาคอลเลกเตอร์ เชื่อมโยงผ่านวงจรแบนด์พาสฟิวเตอร์ C10, L2 และ C11 ออกเอาต์พุตผ่านทางหม้อแปลงการแมทช์ T4 เข้าสายสัญญาณลงไปเข้าเพาเวอร์ซัพพลาย ขณะเดียวกันแรงดัน AC12 V จากเพาเวอร์ซัพพลายก็จะจ่ายขึ้นตามสายนำสัญญาณผ่านขดลวดของหม้อแปลงการแมทช์ T4 ผ่านขดลวด L3 เข้าวงจรเรกติไฟเออร์และฟิวเตอร์ให้เป็นไฟตรงด้วย D2 และ C14 จ่ายผ่าน R8 เพื่อเป็นแรงดันไบแอสแก่ TR1 และ TR2

วงจรเพาเวอร์ซัพพลายดังรูป (ข) นั้นมีปลั๊กเสียบรับไฟ AC 220 V เข้าขดไพรมารีของหม้อแปลงแล้วลดแรงดันให้ต่ำลงเป็น AC12 V ส่งผ่านขดลวด CH และ L1 เพื่อป้อนขึ้นสายนำสัญญาณไปเลี้ยงบูสเตอร์ข้างบน และเมื่อสัญญาณโทรทัศน์เดินทางลงมาก็จะถูกกั้นด้วย L1 สัญญาณโทรทัศน์จึงเชื่อมโยงผ่าน C2 ออกเอาต์พุตไปยังเครื่องรับต่อไป สำหรับจุดต่อสายของเพาเวอร์ซัพพลายนั้นหากใช้สายนำสัญญาณ 300 โอห์ม ให้ต่อเข้าจุดต่อ 300 โอห์ม แต่กรณีใช้สาย 75 โอห์ม ให้ต่อเข้าจุดต่อ 75 โอห์ม และตัดสายบนจุด \* ออกเพื่อไม่ให้สัญญาณบางส่วนสูญเสียไป

จากการทำงานดังกล่าวจึงเห็นได้ว่าเครื่องจะทำงานได้ต้องมีทุกส่วนสมบูรณ์ ตั้งแต่เพาเวอร์ซัพพลาย สายนำสัญญาณ ตัวขยายสัญญาณ และแผงรับสัญญาณ หากส่วนใดส่วนหนึ่งชำรุดก็จะไม่สามารถขยายสัญญาณได้ เช่น สายนำสัญญาณขาด หรือลัดวงจรก็จะมีไฟไปเลี้ยงวงจรขยาย การทำงานก็จะหยุดโดยสิ้นเชิง

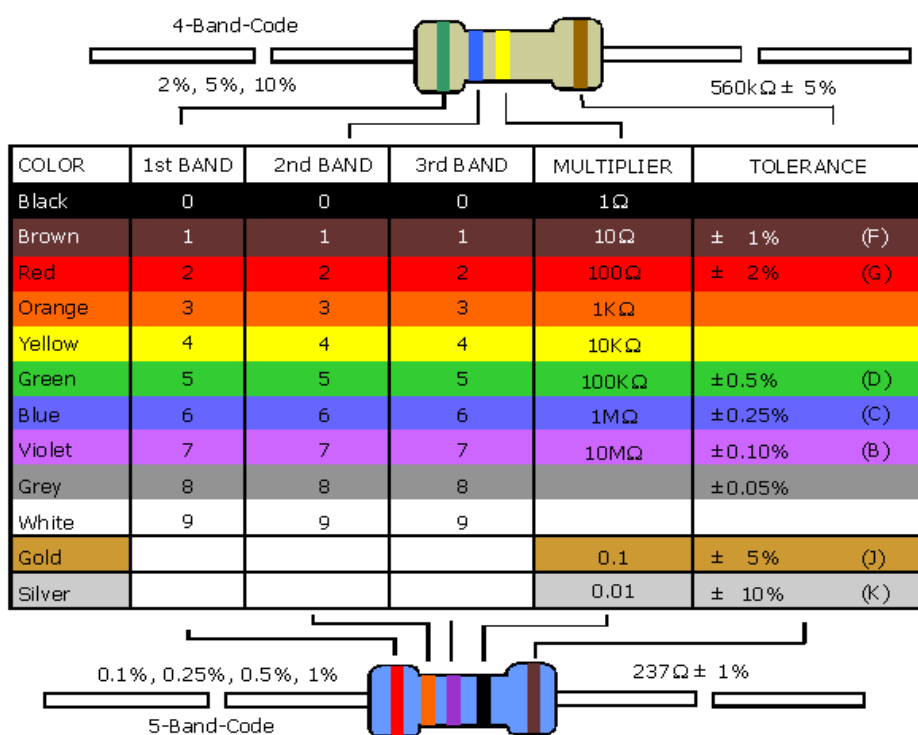
## บทที่ 5

### อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน

อุปกรณ์ที่ปรากฏในวงจรของวงจรขยายแบนกว้างมีดังนี้

#### 5.1 ตัวต้านทาน (Resistor)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จำกัดกระแสไฟฟ้า เนื่องจากภายในตัวมีค่าที่เรียกว่า “ค่าความต้านทาน” ซึ่งถ้าค่าความต้านทานมาก กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านได้น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าความต้านทานน้อย กระแสไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านได้มาก ทั้งนี้เพื่อให้ได้กระแสและแรงดันไฟฟ้าตามต้องการ การนำตัวต้านทานมาใช้กับวงจร เมื่อมีกระแสและแรงดันจ่ายให้กับวงจร จะทำให้เกิดพลังงานเกิดขึ้นกับตัวต้านทาน พลังงานที่ได้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานอย่างอื่น เช่น พลังงานความร้อน แต่ไม่สามารถจ่ายกลับให้กับแหล่งจ่ายหรือวงจรได้ ในการพิจารณาทางความถี่แล้ว ตัวต้านทานจะยอมให้ทุกความถี่ผ่านได้แต่จะเกิดการลดทอนพลังงาน



รูปที่ 5.1 การอ่านค่าความต้านทาน

ตัวอย่างการอ่านค่าแบบ 4 แถบ ได้มาจากซ้ายมาขวาดังนี้ เหลือง-เขียว-ส้ม-ทอง แถบที่ 1 คือสีเหลืองแทนด้วยเลข 4 แถบที่ 2 สีเขียวแทนด้วยเลข 5 แถบที่ 3 เป็นตัวคูณสีส้มแทนด้วย 1000 แถบที่ 4 เป็นค่าความผิดพลาดสีทองแทนด้วย  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่าที่อ่านได้ก็คือ 45 กิโลโอห์ม  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างการอ่านค่าแบบ 5 แถบ ไล่จากซ้ายไปขวาดังนี้ เขียว-น้ำตาล-ดำ-แดง-น้ำตาล สีเขียวแทนด้วยเลข 5 สีน้ำตาลแทนด้วยเลข 1 สีดำแทนด้วยเลข 0 ตัวคูณสีแดงแทนด้วยเลข 100 ค่าความผิดพลาดสีน้ำตาลแทนด้วย  $\pm 1$  เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่าที่อ่านได้คือ 51 กิโลโอห์ม  $\pm 1$  เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.1 ตารางเทียบคุณสมบัติของตัวต้านทานแบบต่าง ๆ

ชนิดของ ตัว ต้านทาน	โครงสร้าง	ข้อดี	ข้อเสีย	ค่าที่ใช้งาน	อัตราการ ทน กำลังไฟฟ้า (W)	ค่าสัมประสิทธิ์ ทางอุณหภูมิ (ppm/°C)
คาร์บอน	คาร์บอน	มีค่าความ เหนียวต้านทาน แรงดันสูง	มีค่าความ ผิดพลาดสูง กำหนดสัญญาณ รบกวนสูง	10 โอห์ม ถึง 22 เมกกะ โอห์ม	0.25 - 1	"+200 ถึง - 2000"
คาร์บอน ฟิล์ม	เป็นฟิล์ม คาร์บอนวาง บนเซรามิก	ราคาถูก	เมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้นค่าเริ่มต้น ไม่แน่นอน	1 โอห์ม ถึง 10 เมกกะ โอห์ม	0.125 - 2	"+200 ถึง - 1000"
เมทัล ฟิล์ม	เป็นฟิล์ม โลหะอัลลอยด์ วางบนเซรามิก	มีความเที่ยงตรง สูง	ราคาแพง	5 โอห์ม ถึง 10 เมกกะ โอห์ม	0.25 - 3	$\pm 50$
เมทัล ออกไซด์	เป็นฟิล์ม ออกไซด์ของ โลหะบางๆ วางบนแก้ว	ประสิทธิภาพ ทางด้านอุณหภูมิ สูง กำหนด สัญญาณรบกวน ต่ำ	ราคาแพง	0.2 โอห์ม ถึง 100 กิโลโอห์ม	0.5 - 0.7	$\pm 200$
ซีเมนต์	เป็นแท่นเซรามิก ห่อหุ้มด้วย ซิลิกอนแข็ง	ใช้งานที่อุณหภูมิ สูงได้ดี	มีค่าความ เหนียวสูง กว่าแบบฟิล์ม	0.1 โอห์ม ถึง 33 กิโล โอห์ม	3-20.	$\pm 100$
ตัวถัง SMD	เป็นเซรามิก	ขนาดเล็ก	ทนกำลังงานต่ำ	1 โอห์ม ถึง 10 เมกกะ โอห์ม	0.25	$\pm 200$

## 5.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor or Condenser)

ค่าของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นเฟรด(F) คาปาซิเตอร์จะจัดสร้างขึ้นมาใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้หลายรูปแบบ โดยอาศัยหลักการเก็บประจุและคลายประจุ สามารถนำมาใช้ในวงจรกรองกระแส(filter) ในการทำงานของคาปาซิเตอร์กระแสจะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา การทำงานของวงจรเมื่อมีแรงดันจ่ายให้กับคาปาซิเตอร์จะทำให้เกิดกระแสไหลภายในวงจร เมื่อมีกระแสไหลก็จะมีพลังงานเกิดขึ้น พลังงานที่เกิดขึ้นสามารถที่จะจ่ายกลับคืนให้กับแหล่งจ่ายและสามารถจ่ายให้กับวงจรได้ โดยที่คุณสมบัติทางความถี่ที่สำคัญของตัวเก็บประจุก็จะยอมให้ความถี่สูงผ่านได้ง่ายและความถี่ต่ำผ่านได้ยาก ซึ่งภายในตัวเก็บประจุประกอบด้วยโลหะตัวนำ 2 แผ่น โดยมีสารไดอิเล็กตริกกันอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง และสารไดอิเล็กตริกนี้เองเป็นตัวแยกประเภทของตัวเก็บประจุ โดยตัวเก็บประจุต่างชนิดกันก็มีการใช้งานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบการใช้งานของตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ


ชนิดของตัวเก็บประจุ	การใช้งาน
อิเล็กโทรไลต์	ใช้ในวงจรกรองแรงดันไฟฟ้าตรงที่ได้จากเรกติไฟร์
	ใช้ในการคัปปลิงสัญญาณในวงจรขยายเสียง
แทนทาลัม	ใช้งานที่ต้องการความแม่นยำของค่าความจุสูง
เซรามิกส์	ใช้ในวงจรเรโซแนนซ์
	ใช้ในวงจรกรองความถี่สูง
กระดาษ	ใช้ในการเพาเวอร์ฟกเตอร์
โพลีเอสเตอร์	ใช้งานได้ทั่วไป
	มีค่าให้เลือกมากมาย
โพลีคาร์บอนเนต	ใช้ในการชดเชยอุณหภูมิ
โพลีสไตรีน	ใช้ในวงจรจูนหรือออสซิลเลเตอร์
โพลีโพลไพลีน	อินเวอร์เตอร์กำลังสูงๆ
	คอนเวอร์เตอร์

## 5.3 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)


มีหน่วยวัดเป็นเฮนรี (H) ปกติแล้วค่านี้จะใหญ่มาก การใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์จึงใช้หน่วยเล็กลงมาคือมิลลิเฮนรี (mH) และไมโครเฮนรี (uH) ในวงจรจะมีแรงดันเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้นเท่านั้น ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับกระแสจะล้าหลังแรงดันอยู่

90 องศา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกิดขึ้น จะทำให้มีกระแสเกิดขึ้นและมีพลังงานเกิดขึ้นในขดลวด ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นสามารถที่จะนำเอาออกไปใช้งานได้ ไม่ว่าจะพลังงานที่กลับคืนให้กับแหล่งจ่ายหรือว่าจ่ายให้กับวงจร และคุณสมบัติทางความถี่ที่สำคัญของตัวเหนี่ยวนำคือความถี่ต่ำสามารถที่จะผ่านได้ง่ายแต่ที่ความถี่สูงผ่านได้ยาก ซึ่งค่าตัวเหนี่ยวนำค่ามากๆ สามารถที่จะหาซื้อได้ ซึ่งส่วนมากจะมีขายแบบการอ่านค่าแถบสีแทนค่าของตัวเหนี่ยวนำ โดยการอ่านแถบสีของตัวเหนี่ยวนำเป็นดังนี้ แบบ 4 สีเรียงจากซ้ายไปขวาคือ แดง-ม่วง-น้ำตาล-ทอง แถบที่ 1 สีแดงแทนด้วยเลข 2 แถบที่ 2 สีม่วงแทนด้วยเลข 7 แถบที่ 3 เป็นตัวคูณสีน้ำตาลแทนด้วย 10 และแถบที่ 4 ก็คือค่าความผิดพลาดสีทองแทนด้วยค่า  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่าที่อ่านได้ก็คือ 270 ไมโครเฮนรี ค่าความผิดพลาด  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวเหนี่ยวนำแบบแถบสี 5 แถบส่วนมากไม่ค่อยมีขาย แต่ค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าน้อยๆ เช่น 10 นาโนเฮนรี ส่วนมากแล้วตัวเหนี่ยวนำแบบนี้จะได้มาจากการออกแบบโดยการพันขดลวดทองแดง

**INDUCTOR COLOR GUIDE**  
Result Is In  $\mu\text{H}$

4-BAND-CODE  270 $\mu\text{H} \pm 5\%$

COLOR	1st BAND	2nd BAND	MULTIPLIER	TOLERANCE
BLACK	0	0	1	$\pm 20\%$
BROWN	1	1	10	Military $\pm 1\%$
RED	2	2	100	Military $\pm 2\%$
ORANGE	3	3	1,000	Military $\pm 3\%$
YELLOW	4	4	10,000	Military $\pm 4\%$
GREEN	5	5		
BLUE	6	6		
VIOLET	7	7		
GREY	8	8		
WHITE	9	9		
NONE				Military $\pm 20\%$
GOLD			0.1 / Mil. Dec. Pt.	Both $\pm 5\%$
SILVER			0.01	Both $\pm 10\%$

Military Identifier  6.8 $\mu\text{H} \pm 10\%$   
MILITARY CODE

รูปที่ 5.2 การอ่านค่าตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

1) ตัวเหนี่ยวนำพันชั้นเดียวบนแกนอากาศ ความยาวของตัวเหนี่ยวนำอย่างน้อยที่สุดเท่ากับรัศมีของตัวเหนี่ยวนำ มักใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณวิทยุ มีสูตรการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำคือ

$$L = \frac{N^2 r^2}{245(0.9r + l)}$$



$L$  = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น ไมโครเฮนรี(uH)

$N$  = จำนวนรอบ

$l$  = ความยาวของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร(mm)

$r$  = รัศมีของตัวนำ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร(mm)

2) การออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยใช้อากาศเป็นแกน

$$L = \frac{0.2a^2n^2}{3a + 9b + 10c}$$

$L$  = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น ไมโครเฮนรี(uH)

$a$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

$b$  = ความยาวของขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว ( 1 นิ้วเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร)

$c$  = รัศมีของขดลวด มีหน่วยเป็นนิ้ว

$n$  = จำนวนรอบ



รูปที่ 5.3 การอ่านค่าตัวเหนี่ยวนำ

ตัวอย่างการคำนวณ

$$a = 0.2480 \text{ นิ้ว}$$

$$b = 0.3149 \text{ นิ้ว}$$

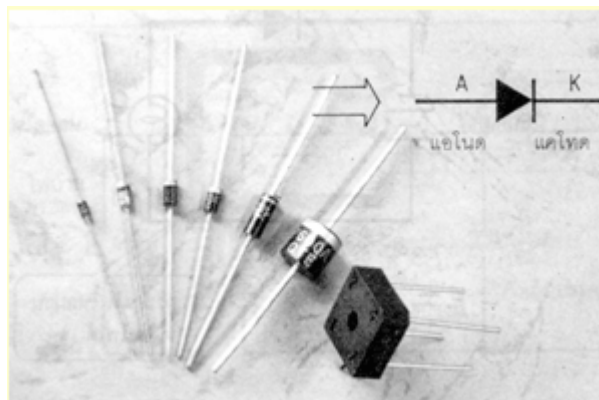
$$c = 0.0866 \text{ นิ้ว}$$

$$n = 7$$

$$L = \frac{0.2 \times 0.2480^2 \times 7^2}{3 \times 0.2480 + 9 \times 0.3149 + 10 \times 0.0866} = 135.6 \text{ nH}$$

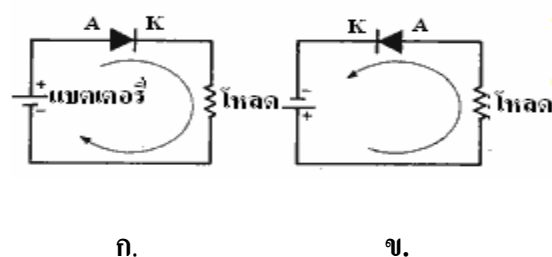
#### 5.4 ไดโอด (Diode)

ไดโอดเป็น ชนิดหนึ่ง ที่จำกัดทิศทางการไหลของ โดยมันจะยอมให้ ไหลในทิศทางเดียว และกั้นการไหลในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นจึงอาจถือว่าไดโอดเป็นตัวตรวจสอบแบบอย่างหนึ่ง ซึ่งนับเป็นประโยชน์อย่างมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแรงดันไฟฟ้าใน วงจรภาคจ่ายไฟ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันไดโอดที่ใช้ทั่วไปส่วนใหญ่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำเช่นซิลิกอน หรือ เจอเมเนียม ดังรูป



รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะและสัญลักษณ์ของไดโอด

- เมื่อต่อไฟฟ้าขั้วบวก (+) เข้าขั้วแอโนด (A) ของไดโอด มันจะยอมให้ไฟบวกผ่านได้
  - เมื่อต่อไฟฟ้าขั้วลบ (-) เข้าหาขั้วแคโทด (K) ของไดโอด มันจะยอมให้ไฟลบผ่านได้
- ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.5

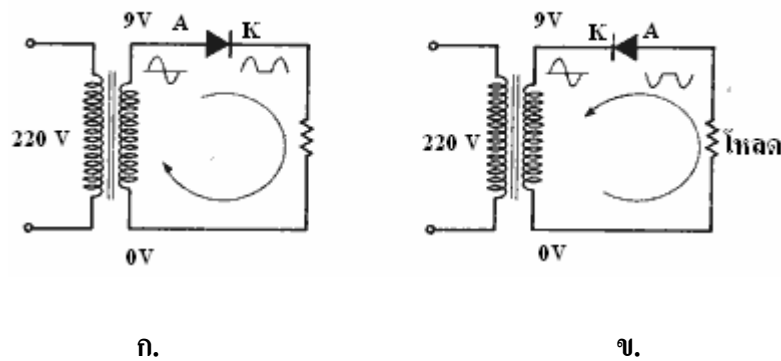
ก. แสดงการต่อไฟกระแสตรงกับไดโอด

ข. ถ้าสลับขั้วไดโอดต้องสลับขั้วแบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟจึงไหลผ่านได้

ถ้าต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น ไฟบ้านขนาด 220 โวลต์ แล้วผ่านหม้อแปลงให้เหลือไฟต่ำ

- เมื่อต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้าหาขั้วแอนโนด(A)ของไดโอดมันจะยอมให้ไฟบวกผ่านได้เดียว
- และถ้าต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้าหาขั้วแคโทด (K) ของไดโอดมันจะยอมให้ไฟลบผ่านได้

อย่าง เดียว ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.6

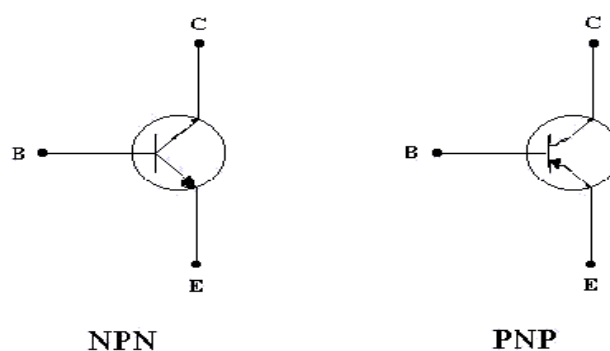
ก. การต่อไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับไดโอดจะมีเฉพาะไฟขั้วบวกออกมา

ข. ได้เฉพาะไฟลบออกมา

### 5.5 ทรานซิสเตอร์ (TRANSISTORS)

ทรานซิสเตอร์ คือ สิ่งประดิษฐ์ทำจากสารกึ่งตัวนำมีสามขา (Three Leads) กระแสหรือแรงเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่ขาหนึ่งจะควบคุมกระแสที่มีปริมาณมากที่ไหลผ่านขาทั้งสองข้างได้ หมายความว่าทรานซิสเตอร์เป็นทั้งเครื่องขยาย (Amplifier) และสวิตช์ทรานซิสเตอร์

ประเภทของทรานซิสเตอร์ (Type of Transistors)



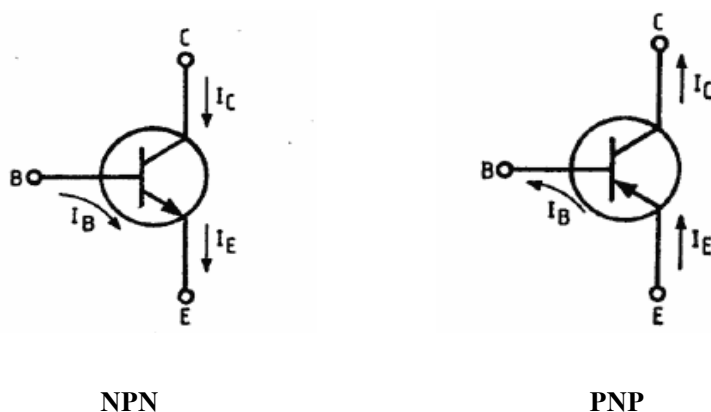
รูปที่ 5.7 แสดงสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 แบบ

ทรานซิสเตอร์แบบ NPN ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด N จำนวน 2 ชั้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด P จำนวน 1 ชั้นแสดงสัญลักษณ์เป็นดังรูปที่ 5.7

ทรานซิสเตอร์แบบ PNP ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P จำนวน 2 ชั้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด N จำนวน 1 ชั้น แสดงสัญลักษณ์เป็นดังรูปที่ 5.7

### ความแตกต่างของทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิด

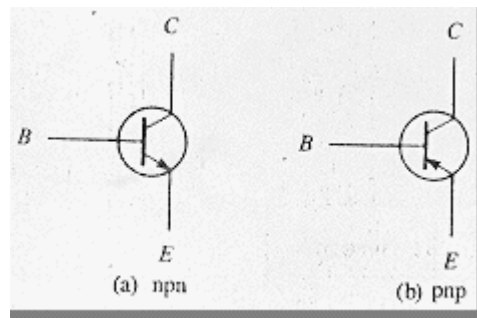
ความแตกต่างของทรานซิสเตอร์แบบ PNP และ NPN คือทิศทางของกระแสที่ไหลเข้าออก จากตัวทรานซิสเตอร์ สังเกตได้ว่า กระแสไหลจากทิศทางของหัวลูกศรของทรานซิสเตอร์ (กระแสในที่นี่หมายถึง กระแสขั้วที่ไหลจากขั้วบวกไปขั้วลบ) ทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดมีทิศทางการไหลของ กระแสกลับกัน จากรูปกล่าวได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านขา E จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ขา C รวมกับที่ขา B เป็นกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ แต่กระแสที่ขา C เท่ากับกระแสที่ขา B คูณด้วย อัตราขยายของทรานซิสเตอร์ ( $h_{FE}$ ) เพราะฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ จึงถูกควบคุม โดยกระแสที่ไหลผ่านขา B นั่นเอง



รูปที่ 5.8 อธิบายทิศทางการไหลของกระแสในทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิด

### โครงสร้างของทรานซิสเตอร์

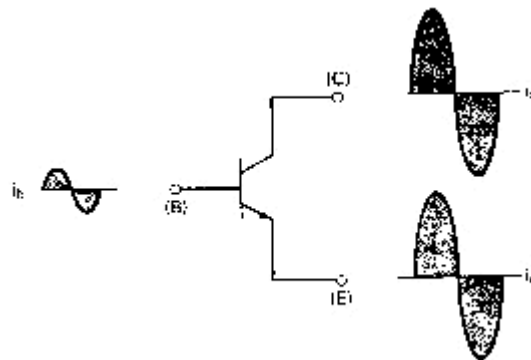
โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้น แต่ละชั้นจะต่อลวดตัวนำจากเนื้อสารกึ่งตัวนำไปใช้งาน ชั้นที่เล็กที่สุด (บางที่สุด) เรียกว่า เบส (Base) ตัวอักษรย่อ B สำหรับสารกึ่งตัวนำชั้นที่เหลือคือ คอลเลกเตอร์ (collector หรือ c) และอิมิตเตอร์ (Emitter หรือ E) นั่นคือ ทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN จะมี 3 ขา คือ ขาเบส ขาคอลเลกเตอร์ ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์นิยมเขียน ทรานซิสเตอร์แทนด้วยสัญลักษณ์ดังรูป



รูปที่ 5.9 สัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์

### กระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์(Transistor and Voltage )

1) กระแสของทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกควบคุมด้วยกระแสเบส [Base Current;  $I_B$ ] เมื่อ  $I_B$  มีการเปลี่ยนแปลงแม้เพียง เล็กน้อยก็จะทำให้กระแสเอมิเตอร์ [Emitter Current;  $I_E$ ] และกระแสคอลเลคเตอร์ [Collector Current;  $I_C$ ] เปลี่ยนแปลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้าบริเวณการทำงาน (Operating Region) หรือทำการไบอัสที่รอยต่อของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่งให้เหมาะสม ก็จะได้  $I_E$  และ  $I_C$  ซึ่งมีขนาดมากขึ้นเมื่อเทียบกับ  $I_B$



รูปที่ 5.10 สัญญาณเอาต์พุตที่ขั้ว E ( $i_E$ ) และที่ขั้ว C ( $i_C$ )

จากรูปที่ 5.10 เมื่อจ่ายสัญญาณกระแส ac ที่ขั้วเบส ( $i_B$ ) หรือที่ด้านอินพุตของทรานซิสเตอร์ ก็จะได้รับสัญญาณเอาต์พุตที่ขั้ว E ( $i_E$ ) และที่ขั้ว C ( $i_C$ ) มีขนาดเพิ่มขึ้น

ตัวประกอบหรือแฟกเตอร์ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าจากขั้วเบสไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเรียกว่า อัตราขยายกระแสไฟฟ้า (Current Gain) คือ เบตา (Beta) ถ้าหากระแส  $I_C$  ของทรานซิสเตอร์ ก็ทำการคูณ  $I_B$  ด้วย Beta เขียนเป็นสมการได้คือ

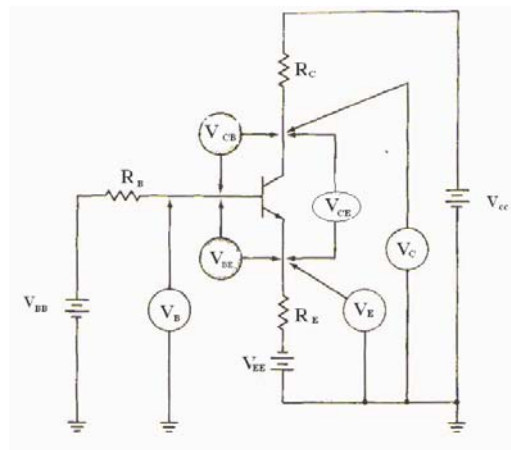
$$I_C = \text{Beta} * I_B$$

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C \sim I_E$$

2) แรงดันของทรานซิสเตอร์ ขณะต่อทรานซิสเตอร์เพื่อใช้กับงานจริง มีแรงดันไฟฟ้าหลายประการเกิดขึ้น ดังนี้

- $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$ , และ  $V_{BB}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- $V_C$ ,  $V_B$  และ  $V_E$  เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้ว C, B และ E
- $V_{CE}$ ,  $V_{BE}$  และ  $V_{CB}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างขั้วที่ระบุตามตัวห้อย ซึ่งจะเห็นได้ดังรูปที่ 5.11

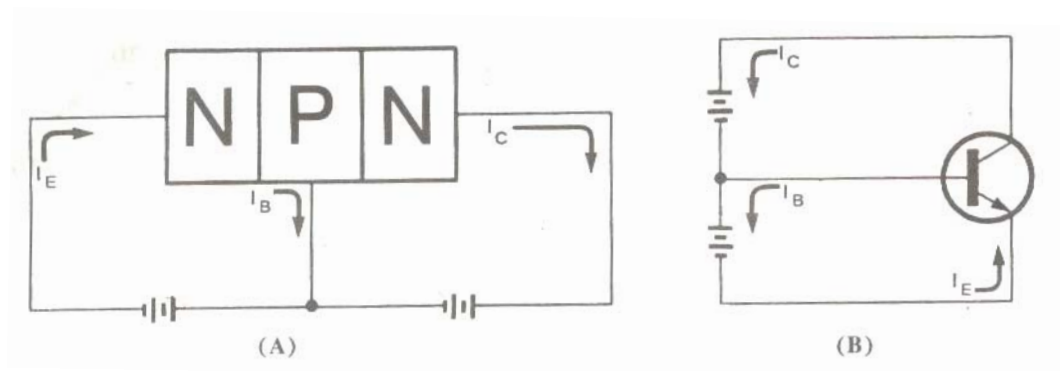


รูปที่ 5.11 สัญญาณเอาต์พุตที่ขั้ว E ( $i_e$ ) และที่ขั้ว C ( $i_c$ )

### หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์

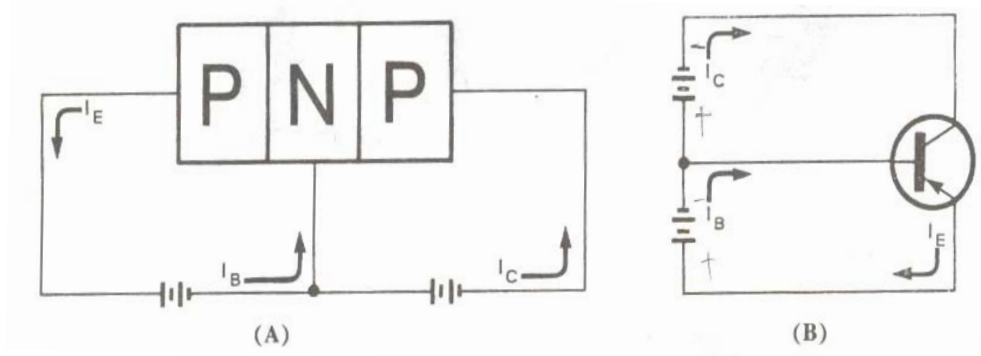
ทรานซิสเตอร์สามารถนำไปใช้งานได้หลายทาง แต่หน้าที่พื้นฐานของมันคือ จะใช้ทำการขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้า

ทรานซิสเตอร์จะต้องถูกไบอัสจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายนอก ซึ่งทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 แบบ จะมีการไบอัสไม่เหมือนกัน โดยแบบเอ็นพีเอ็นจะมีการไบอัสให้รอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์เป็นฟอร์เวิร์ดไบอัส และรอยต่อเบสกับคอลเล็กเตอร์เป็นรีเวิร์ดไบอัส ดังแสดงในรูป 5.12 ซึ่งจะแสดงทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าต่างๆด้วย



รูปที่ 5.12 แสดงการไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น

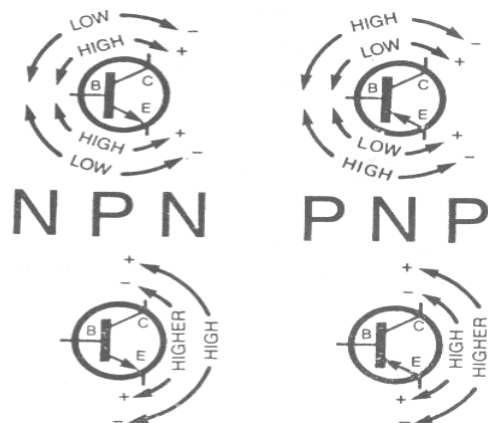
และสำหรับการไบอัสทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพี ก็จะมีการไบอัสให้รอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์เป็นฟอเวิร์ดไบอัส และรอยต่อเบสกับคอลเลกเตอร์เป็นรีเวิร์ดไบอัส ดังแสดงในรูป 5.13 ซึ่งจะแสดงทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าต่างๆด้วย



รูปที่ 5.13 แสดงการไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี

### การทดสอบทรานซิสเตอร์

เราจะทำการทดสอบว่าทรานซิสเตอร์เกิดข้อผิดพลาด หรือร้าวถึงกันหรือไม่ โดยใช้โอห์มมิเตอร์ สำหรับลักษณะการวัดทดสอบจะแสดงในรูป 5.14 ซึ่งเครื่องหมาย + หรือ - นั้นหมายถึงขั้วของสายมิเตอร์ และค่าความต้านทานที่เป็นค่าสูง (HIGH) มีค่าประมาณ 10,000 โอห์ม หรือมากกว่า ส่วนค่าความต้านทานต่ำ (LOW) จะมีค่าต่ำกว่า 10,000 โอห์ม



รูปที่ 5.14 แสดงการวัดทดสอบทรานซิสเตอร์และผลที่ได้

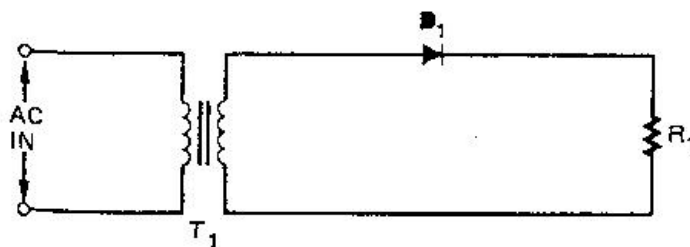
## บทที่ 6

### วงจรแปลงไฟ หรือวงจรเรกติไฟร์

วงจรเรกติไฟร์ มีหน้าที่แปลงแรงดันสลับที่รับเข้ามาให้กลายเป็นแรงดันสลับออกไปทางเอาต์พุต แบ่งได้ 3 ชนิด

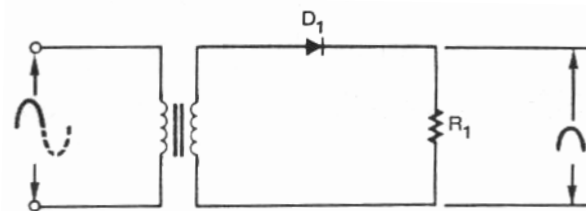
1. ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ (half wave rectifier)
2. ฟูลเวฟ เรกติไฟร์ (full wave rectifier)
3. บริดจ์ เรกติไฟร์ (bridge rectifier)

รูปที่ 6.1 แสดงวงจรพื้นฐานของฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ จะเห็นได้ว่ามีไดโอดต่ออนุกรมกับโหลด โดยที่กระแสในวงจรไหลไปในทิศทางเดียวเท่านั้น เพราะมีไดโอดเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลอยู่

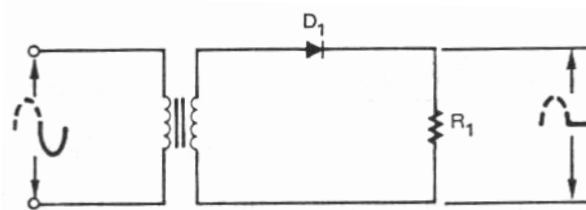


รูปที่ 6.1 วงจรพื้นฐานฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์

รูปที่ 6.2 แสดงวงจรฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ในระหว่างที่มีคลื่นไซน์ ครึ่งคลื่นซีกบวกจ่ายเข้ามาทางด้านปริมภูมิของหม้อแปลง ทำให้ทางด้านทุติยภูมิเกิดเป็นคลื่นซายน์ครึ่งคลื่นทางซีกบวกเช่นกัน ดังนั้นไดโอดจึงได้รับแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด ทำให้กระแสไฟไหลในวงจรเกิดแรงดันไฟตกคร่อมโหลด



รูปที่ 6.2 ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ในระหว่างครึ่งคลื่นซีกบวก

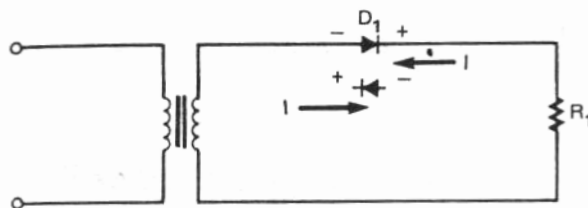


รูปที่ 6.3 ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ในระหว่างครึ่งคลื่นซีกลบ



รูปที่ 6.3 แสดงวงจรในระหว่างคลื่นซายน์ ครึ่งคลื่นซิกลบจ่ายเข้ามาทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ทำให้ทางด้านทุติยภูมิเกิดเป็นคลื่นซายน์ครึ่งคลื่นซิกลบเช่นกัน ดังนั้นไดโอดจึงไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากได้รับแรงดันแบบรีเวิร์คไบอัส เป็นผลให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมโหลด

วงจรฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์จะทำงานในช่วงครึ่งคลื่นเท่านั้น ซึ่งอาจจะเป็นครึ่งคลื่นทางด้านซิกบวกหรือครึ่งคลื่นทางด้านซิกลบ ก็ได้แล้วแต่ว่าจะต่อไดโอดฟอร์เวิร์คในลักษณะใด ดังแสดงในรูป 6.4 ความถี่พัลส์ที่ได้รับจะเหมือนกับความถี่ที่จ่ายเข้ามา ซึ่งความถี่ของพัลส์นี้เราเรียกว่าความถี่เปิด

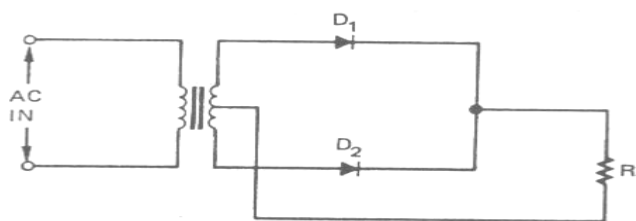


รูปที่ 6.4 การกำหนดทิศทางการไหลของกระแสโดยไดโอด

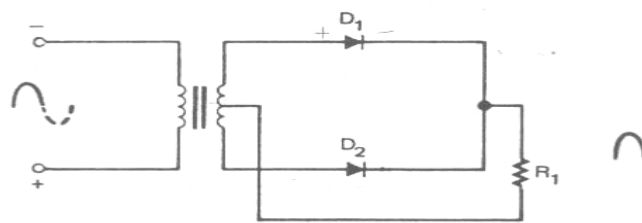
ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ มีข้อเสียหลายประการทั้งนี้เพราะการไหลของกระแสสารกึ่งนำได้ในช่วงครึ่งคลื่นเท่านั้นของแต่ละลูกคลื่น ดังนั้นเพื่อแก้ไขข้อเสียอันนี้เราจึงใช้ฟูลเวฟแทน

รูปที่ 6.5 แสดงวงจรฟูลเวฟ เรกติไฟร์พื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่จำเป็นคือไดโอด 2 ตัว และหม้อแปลงจะต้องเป็นชนิดเซ็นเตอร์แท็ป (center-tapped) โดยที่เซ็นเตอร์จะเป็นกราวด์ และแรงดันที่แต่ละข้างของหม้อแปลงจะต่างเฟสกัน 180 องศา

รูปที่ 6.6 แสดงฟูลเวฟ เรกติไฟร์ในระหว่างที่มีสัญญาณจ่ายเข้ามาเป็นครึ่งคลื่นซิกบวก แอโนดของไดโอด D1 เป็นบวก และแอโนดของไดโอด D2 เป็นลบ ดังนั้นไดโอด D1 จึงได้รับแรงดันแบบฟอร์เวิร์คไบอัสเป็นผลให้สามารถนำกระแสได้ ส่วนไดโอด D2 ได้รับแรงดันแบบรีเวิร์คไบอัส จึงไม่สามารถนำกระแส กระแสไหลจากขั้วเซ็นเตอร์แท็ปของหม้อแปลงผ่านไปยังโหลด และไดโอด D1 จนถึงด้านบนของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง ดังนั้นจึงเกิดแรงดันตกคร่อมโหลดในครึ่งคลื่นซิกบวก



รูปที่ 6.5 วงจรฟูลเวฟ เรกติไฟร์พื้นฐาน

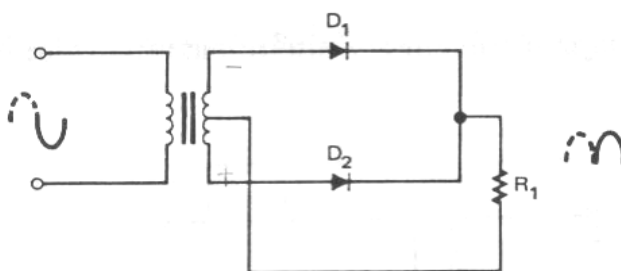


รูปที่ 6.6 วงจรฟูลเวฟ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซีกบวก

รูปที่ 6.7 แสดงฟูลเวฟ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซีกลบของลูกคลื่น แอโนดของไดโอด D2 กลายเป็นบวก และแอโนดของไดโอด D1 กลายเป็นลบ ไดโอด D2 ตอนนี้ได้รับแรงดันฟอเวิร์ดไบอัสเป็นผลให้เกิดการนำกระแสขึ้น ส่วนไดโอด D1 รับแรงดันรีเวิร์ดไบอัสจึงไม่สามารถนำกระแสได้ กระแสไหลจากเซ็นเตอร์แท็ปของหม้อแปลงผ่านโหลดและไดโอด D2 ไปยังด้านล่างของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

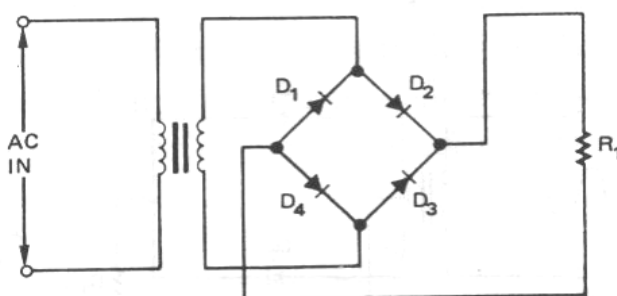
ดังนั้นในฟูลเวฟ เรกติไฟร์ กระแสจะไหลระหว่างครึ่งคลื่นทั้งสองของลูกคลื่น ซึ่งหมายความว่าเกิดความถี่rippleสูงขึ้น

ข้อเสียของฟูลเวฟ เรกติไฟร์ คือต้องใช้หม้อแปลงที่มีเซ็นเตอร์แท็ป ดังนั้นเราจึงนำวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์มาใช้



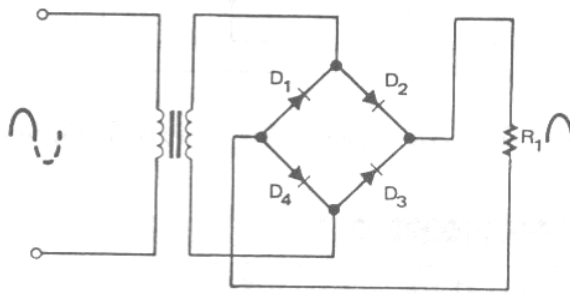
รูปที่ 6.7 ฟูลเวฟ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซีกลบ

รูปที่ 6.8 แสดงวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอดทั้งหมด 4 ตัว วางเรียงลำดับเพื่อให้กระแสไหลผ่านโหลดในทิศทางเดียวเท่านั้น



รูปที่ 6.8 แสดงวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์

รูปที่ 6.9 แสดงการไหลของกระแสระหว่างครึ่งคลื่นซีกบวกของสัญญาณเข้า กระแสจะไหลจากด้านล่างของขดลวดทุติยภูมิขึ้นผ่านไดโอด D4 ผ่านโหลดผ่านไดโอด D2 ไปยังด้านบนของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงจะเกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลดขึ้น



รูปที่ 6.9 บริดจ์ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซิกบวก

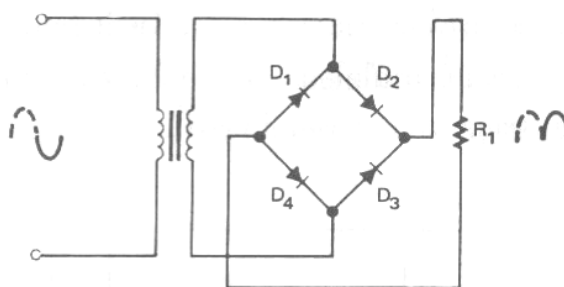
รูปที่ 6.10 แสดงการไหลของกระแสในระหว่างครึ่งคลื่นซิกลบของสัญญาณเข้าด้านบนของขดลวดทุติยภูมิเป็นลบ ละด้านล่างเป็นบวก กระแสจากด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ ลงมาผ่านไดโอด D1 ผ่านโหลดและไดโอด D3 จนถึงด้านล่างของขดลวดทุติยภูมิ สังเกตว่ากระแสไหลผ่านโหลดในทิศทางเดียวกันกับในช่วงระหว่างครึ่งคลื่นซิกบวก จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมโหลดอีกครั้งหนึ่ง

บริดจ์ เรกติไฟร์ เป็นฟูลเวฟ เรกติไฟร์ ชนิดหนึ่งเพราะมันทำงานในครึ่งคลื่นทั้งสองของลูกคลื่น ข้อดีของบริดจ์ เรกติไฟร์ คือไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงที่มีเซ็นเตอร์แท็ป และไม่จำเป็นต้องมีหม้อแปลงก็ได้ ในวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์หม้อแปลงมีหน้าที่ทำให้แรงดันสูงขึ้นหรือต่ำลงเท่านั้น หรือเพื่อแยกแหล่งจ่ายไฟ

#### สรุปถึงความแตกต่างของเรกติไฟร์

- ข้อดีของฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ คือค่าใช้จ่ายน้อย เพราะใช้ไดโอดและหม้อแปลงอย่างละ 1 ตัว แต่ประสิทธิภาพต่ำมาก เพราะใช้สัญญาณเข้าเพียงแค่ครึ่งคลื่นเท่านั้น ทำให้สามารถจ่ายกระแสต่ำ
- ฟูลเวฟ เรกติไฟร์มีประสิทธิภาพสูงกว่าฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ เพราะมันสามารถทำงานได้ทั้งสองครึ่งคลื่นของคลื่นไซน์ ทำให้เกิดความถี่ripple สูงกว่า จึงง่ายต่อการกรอง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้หม้อแปลงที่มีเซ็นเตอร์แท็ป ทำให้แรงดันเอาต์พุตต่ำกว่าฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ ในกรณีหม้อแปลงเหมือนกัน ทั้งนี้เพราะเซ็นเตอร์แท็ปทำให้เกิดการแบ่งแรงดันขึ้น
- บริดจ์ เรกติไฟร์ สามารถทำงานได้โดนปราศจากหม้อแปลง อย่างไรก็ตามหม้อแปลงก็มีส่วนจำเป็นเมื่อต้องการเพิ่มหรือลดแรงดัน ในด้านประสิทธิภาพแล้ว บริดจ์ เรกติไฟร์ จะมีมากที่สุดเมื่อเทียบกับฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ และ ฟูลเวฟ เรกติไฟร์ ข้อเสียของบริดจ์ เรกติไฟร์ คือต้องใช้ไดโอดถึง 4 ตัว แต่อย่างไรก็ดีไดโอดราคาไม่แพงมาก เมื่อเทียบกับหม้อแปลงบนเซ็นเตอร์แท็ป

ด้วยข้อดีของบริดจ์ เรกติไฟร์ ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง จึงนำบริดจ์ เรกติไฟร์ มาใช้ในการออกแบบวงจร



รูปที่ 6.10 บริดจ์ เรกติไฟร์ระหว่างครึ่งคลื่นซิกลอป

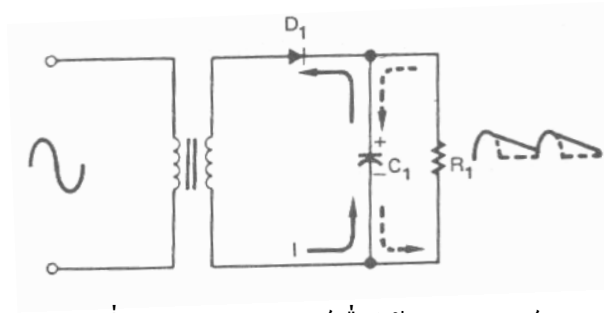
เมื่อนำวงจรเรกติไฟร์ มาประใช้กับวงจรฟิวเตอร์

แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรกติไฟร์ซึ่งอยู่ในรูปของพัลส์ดี ซี ไม่เหมาะสำหรับนำไปใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงต้องมีการกรองหรือฟิวเตอร์ให้พัลส์เกิดความราบเรียบ ก่อนนำไปใช้งาน โดยทั่วไปแล้วแหล่งจ่ายไฟต้องประกอบด้วยวงจรฟิวเตอร์ โดยที่วงจรฟิวเตอร์จะทำหน้าที่แปลงพัลส์ดีซี ให้แปลงเป็นแรงดันดีซีที่ราบเรียบ

ตัวฟิวเตอร์ที่นำมาใช้งานง่ายที่สุดคือตัวคาปาซิเตอร์ โดยการนำตัวคาปาซิเตอร์ไปต่อคร่อมไว้ที่เอาต์พุตของเรกติไฟร์ ดังแสดงในรูป 6.11 และในรูป 6.12 เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแรงดันเอาต์พุตที่ผ่านวงจรฟิวเตอร์ กับแรงดันเอาต์พุตที่ไม่ผ่านวงจรฟิวเตอร์

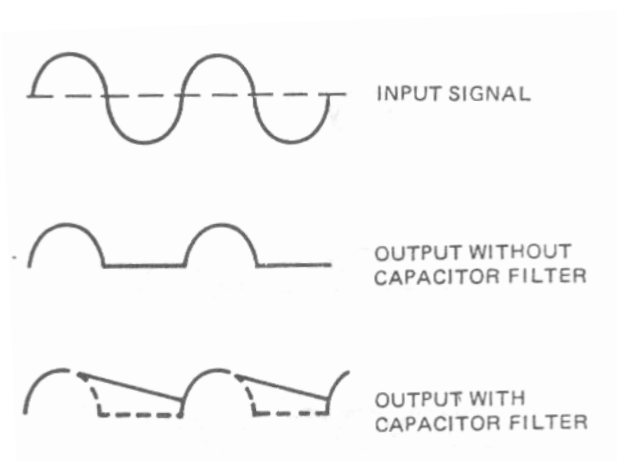
พฤติกรรมของตัวคาปาซิเตอร์ซึ่งต่ออยู่กับวงจรเรกติไฟร์ คือเมื่อแอมโพลของไดโอดเป็นบวกกระแสจะไหลในวงจร ขณะเดียวกันตัวคาปาซิเตอร์จะทำการเก็บประจุ เกิดขั้วขึ้นดังแสดงในรูป 6.11 หลังจากนั้นเมื่อสัญญาณอินพุตมีมุม 90 องศา ซึ่งเป็นระดับแรงดันสูงสุดของแรงดันอินพุต ตัวคาปาซิเตอร์จะเก็บประจุไว้เต็มพอดิ และมีแรงดันเท่ากับแรงดันสูงสุดของอินพุต จากนั้นเมื่อระดับสัญญาณอินพุตเริ่มมีแรงดันลดต่ำลง ตัวคาปาซิเตอร์จะคายประจุออกมาผ่านโหลดตัวต้านทาน ภายในโหลดจะควบคุมการถ่ายประจุของตัวคาปาซิเตอร์ ด้วยเวลาคงที่เท่ากับ RC เวลาคงที่การคายประจุเป็นเวลาที่ยาวนานมากเมื่อเทียบเวลาของลูกคลื่นหนึ่งลูก

หลังจากเวลาผ่านไปหนึ่งในสี่ของลูกคลื่นหนึ่งลูก ตัวคาปาซิเตอร์จะคายประจุให้เกิดกระแสไหลจ่ายแก่โหลด ทำให้แรงดันที่ตัวคาปาซิเตอร์เริ่มลดลง อย่างไรก็ตามก่อนที่จะตัวเก็บประจุ จะทำการคายประจุออกมาหมดนั้น ได้มีลูกคลื่นลูกต่อไปปรากฏขึ้นใหม่อีก เป็นเหตุให้ที่ไดโอดกลายเป็นบวกอีกครั้งหนึ่ง ไดโอดจึงนำกระแสได้ และตัวเก็บประจุก็เริ่มทำการเก็บประจุใหม่เมื่อพัลส์ดีซีผ่านวงจรฟิวเตอร์ก็จะทำให้แรงดันดีซีที่ค่อนข้างเรียบด้วยกระบวนการเก็บประจุ และคายประจุของตัวคาปาซิเตอร์ ดังกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น เป็นผลให้แรงดันเฉลี่ยของเอาต์พุตสูงขึ้น ดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.11 วงจรฟิวเตอร์เมื่อใช้คาปาซิเตอร์

ยิ่งตัวเก็บประจุมีค่ามาก ก็ยิ่งทำให้เวลาค่าคงที่  $RC$  นานขึ้น เป็นผลให้ตัวคาปาซิเตอร์คายประจุช้าลง ความราบเรียบของแรงดันเอาต์พุตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จากวงจรเรกติไฟร์แบบฮาล์ฟเวฟจะเห็นว่าไดโอดจะนำกระแสในช่วงคาบสั้นๆ และเมื่อไดโอดหยุดนำกระแส ตัวคาปาซิเตอร์จะเป็นตัวจ่ายไฟไปเลี้ยงโหลด ถ้าโหลดมีขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้ตัวคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ เพื่อจ่ายกระแสให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด

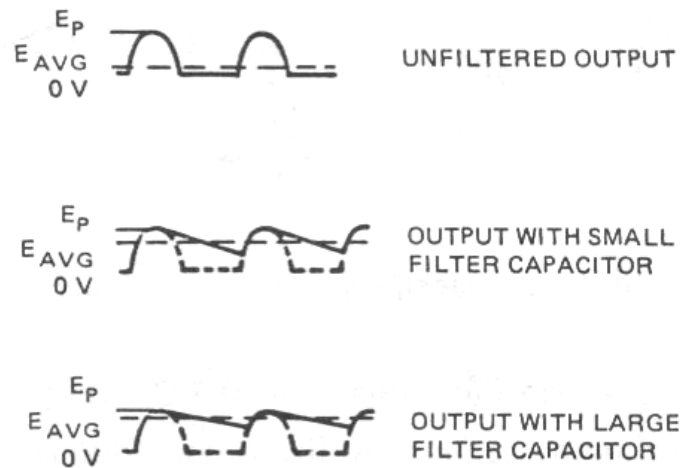


รูปที่ 6.12 แสดงแรงดันเอาต์พุตของฮาล์ฟเวฟ

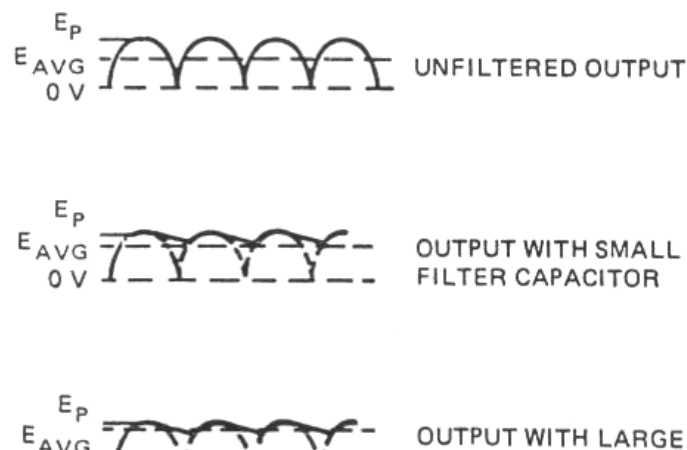
เรกติไฟร์เมื่อไม่ผ่านตัวฟิวเตอร์และเมื่อผ่านตัวฟิวเตอร์

พฤติกรรมของตัวคาปาซิเตอร์ฟิวเตอร์ เมื่อนำไปต่อक्रमวงจรฟูลเวฟ หรือวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์รูปที่ 6.14 แสดงแรงดันเอาต์พุตของฟูลเวฟหรือบริดจ์ เรกติไฟร์ ซึ่งมีความถี่เป็นคู่ เมื่อคาปาซิเตอร์ ฟิวเตอร์ถูกนำมาต่อเข้ากับเรกติไฟร์ตัวคาปาซิเตอร์จะใช้เวลาคายประจุสั้นๆ เท่านั้น ก่อนที่พัลส์ต่อไปจะปรากฏขึ้น แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะสูง ถ้าใช้ตัวคาปาซิเตอร์ที่มีค่ามาก แรงดันสูงสุดจะเท่ากับแรงดันพีคของสัญญาณอินพุต ดังนั้นตัวคาปาซิเตอร์จึงทำหน้าที่กรองให้เกิดแรงดันราบเรียบได้ดีกว่าวงจร ฮาล์ฟเวฟเรกติไฟร์

จุดประสงค์ของตัวคาปาซิเตอร์ในวงจรฟิวเตอร์ คือใช้ทำพัลส์ดีซีจากวงจรเรกติไฟร์ มีความราบเรียบโดยการลดความถี่ริปเปิ้ลลง โดยใช้ตัวคาปาซิเตอร์ที่มีค่ามาก หรือโดยการเพิ่มความต้านทานของโหลด เพื่อให้เวลาการคายประจุของตัวคาปาซิเตอร์นานขึ้น



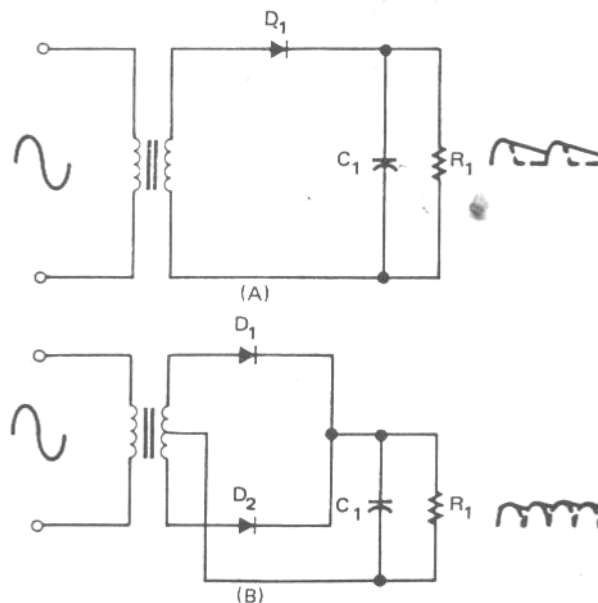
รูปที่ 6.13 ผลความแตกต่างของขนาดคาปาซิเตอร์  
ที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตในวงจรฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์



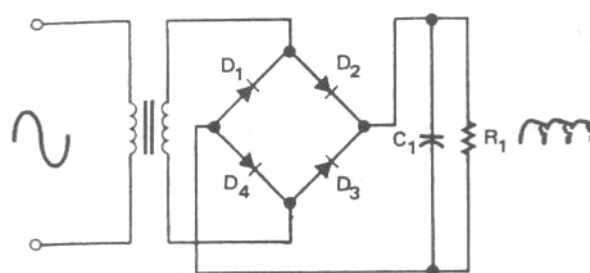
รูปที่ 6.14 ผลความแตกต่างของขนาดคาปาซิเตอร์

ที่มีต่อแรงดันเอาต์พุตในวงจรฟูลเวฟ เรกติไฟร์และบริดจ์ เรกติไฟร์

เป็นความจริงที่ว่าเมื่อเราเพิ่มตัวคาปาซิเตอร์เข้าไปในวงจรเรกติไฟร์ เพื่อทำการฟิวเตอร์แล้วจะทำให้ไดโอดในวงจรเรกติไฟร์ เกิดความเครียดเพิ่มขึ้น ในวงจรฮาล์ฟเวฟและฟูลเวฟ เรกติไฟร์ที่ต่อดัวยวงจรฟิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.15 การเก็บประจุของตัวคาปาซิเตอร์จะเก็บไว้ที่แรงดันพีคของแรงดันทางด้านทุติยภูมิ และยังคงค่าของแรงดันนี้ไว้จนลูกคลื่นที่ผ่านเข้ามาออกไปเมื่อไดโอดมีสถานะเป็นรีเวิร์ดไบอัส ในขณะที่ตัวคาปาซิเตอร์ยังคงมีแรงดันเป็นบวกสูงสุดแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดขณะนั้นจะเป็นสองเท่าของแรงดันพีคทางด้านทุติยภูมิ ดังนั้นการเลือกไดโอดจึงต้องมีการเผื่อแรงดันสูงสุดที่ไดโอดสามารถทนได้ในช่วงนี้ด้วย



รูปที่ 6.15 ฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ (A) และฟูลเวฟ เรกติไฟร์ (B)  
ต่อท้ายด้วยวงจรคาปาซิเตอร์ ฟิวเตอร์



รูปที่ 6.16 บริดจ์ เรกติไฟร์ พร้อมคาปาซิเตอร์ ฟิวเตอร์

แรงดันสูงสุดสำหรับไดโอดที่เมื่อเกิดรีเวิร์ดไบอัสเรียกว่า พีค-อินเวิร์ด โวลต์เตจ (PIV) ในการเลือกไดโอดควรเลือกให้มีค่า PIV สูงกว่าสองเท่าของแรงดันพีคทางด้านทุติยภูมิ ตามที่คิดขึ้นมาไดโอดควรจะทำงานที่ 80 % ของอัตราการใช้ประจุจากแรงดันอินพุตซึ่งสามารถยึดเป็นหลักได้สำหรับฮาล์ฟเวฟ เรกติไฟร์ และ ฟูลเวฟ เรกติไฟร์

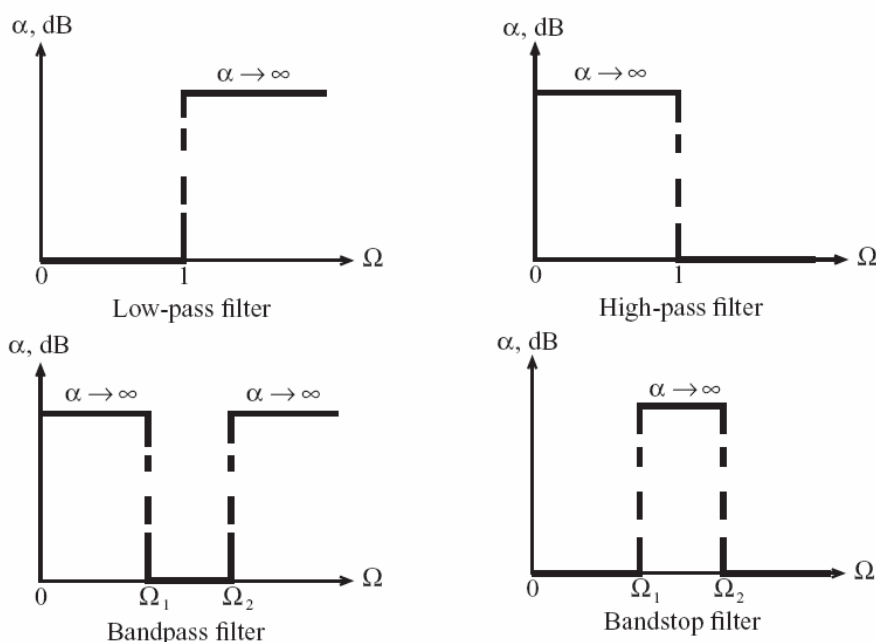
สำหรับไดโอดในวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์จะไม่มีไดโอดตัวใดเลยที่ต้องทนแรงดันเกินกว่าแรงดันพีคของสัญญาณอินพุตของด้านทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ดังนั้นการเลือกใช้ไดโอดจึงเลือกไดโอดที่มีค่า PIV ต่ำได้ จึงนับว่าเป็นข้อดีอย่างหนึ่งของวงจรบริดจ์ เรกติไฟร์

## บทที่ 7

### การออกแบบฟิวเตอร์

#### ชนิดของฟิวเตอร์

ฟิวเตอร์ได้แบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่ Low-pass filter, High-pass filter, Bandpass filter, และ Bandstop filter ซึ่งแต่ละประเภทมีหลักการทำงานที่แตกต่างกัน รูปที่ 7.1 ได้แสดงค่าการลดทอน (Attenuation,  $\alpha$ ) ต่อค่า (Normalized) ของพหุคูณทางความถี่เชิงมุมของฟิวเตอร์ชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะของฟิวเตอร์ทั้ง 4 ชนิด

จากรูปให้ parameter  $\Omega = \frac{\omega}{\omega_c}$  คือ ค่าของความถี่ที่ normalized ด้วย ความถี่เชิงมุม  $\omega_c$

ซึ่ง  $\omega_c$  หมายถึง ความถี่ cut-off สำหรับ low-pass และ high-pass filter หรือ center frequency สำหรับ bandpass และ bandstop filter

#### ความถี่และค่าอิมพีแดนซ์

เมื่อเลือกชนิดของ filter ต้องเลือกค่าตอบสนองการลดทอนที่เหมาะสม โดยดูจาก low-pass มาตรฐาน ขั้นตอนต่อไปคือการแปลงวงจรมาตรฐาน ให้อยู่ในรูป filter ที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ ข้อควรจำ ความถี่ cut off ของวงจร มาตรฐาน คือ 0.159 Hz ( = 1 rad/sec) ซึ่งเกิดจาก การกระทำของ  $R_s$  และ  $R_L$  ที่ normalized แล้ว ดังนั้นจะได้  $R_L = 1$  โอห์ม



### การแปลงค่าโดยใช้สูตร

$$C = \frac{C_n}{2\pi f_c R} \quad (\text{สมการ 7.1})$$

$$L = \frac{R L_n}{2\pi f_c} \quad (\text{สมการ 7.2})$$

โดยที่  $C$  = ค่าสุดท้ายของตัวเก็บประจุ

$L$  = ค่าสุดท้ายของตัวเหนี่ยวนำ

$C_n$  = ค่ามาตรฐาน ของ low-pass

$L_n$  = ค่ามาตรฐาน ของ low-pass

$R$  = ค่าสุดท้ายของความต้านทานของโหลด

$f_c$  = ค่าความถี่ cut off

ค่า  $R_s$  normalized ของ low-pass มาตรฐาน ต้องแปลงให้อยู่ในรูปค่าสุดท้าย ด้วยการคูณด้วยค่า  $R_L$  ดังนั้น Ratio ของค่าทั้งสองต้องเท่ากัน

### กระบวนการการออกแบบ low-pass filter ทำได้ด้วยกระบวนการดังนี้

1. จะจงค่าการตอบสนองการลดทอน ณ. ความถี่ที่เลือก
2. ทำการ normalize ความถี่ที่สนใจหารด้วยความถี่ cut off ของ filter ขั้นตอนที่กำลังกล่าวมาจะให้ข้อมูลเหมือนกับเส้นโค้งการลดทอน ที่จุด 3 dB ของเส้นโค้ง  $f/f_c = 1$
3. หาจำนวนที่มากที่สุดของ ripple ที่ยอมรับได้ใน pass band  
ข้อควรจำ จำนวน ripple ที่ดีกว่า จะมีค่ามากกว่า ค่าที่เลือกใน filter นี้ ค่า ripple ที่สูงกว่าจะต้องผ่านการแยกองค์ประกอบออกมาแล้ว
4. ทำการแมทช์ ค่าการลดทอนที่ normalize ( step1 และ 2 ) ด้วย เส้นโค้ง การลดทอนที่ได้จากบทนี้ และสามารถหาค่า fudge factor จากการวัด ขั้นตอนนี้จะแสดงให้เห็นค่าที่น้อยที่สุดของส่วนวงจรที่เราสามารถหาได้ เมื่อให้ชนิดของ filter มา
5. หาค่า low-pass มาตรฐาน จากตาราง
6. นำค่าทั้งหมดที่ได้ จากความถี่ และอิมพีแดนซ์ สุดท้าย มาออกแบบ

### ตัวอย่าง 7.1

ค่า low-pass มาตรฐาน ที่ความถี่ cut off = 50 Hz และค่า  $R_L = 250$  โอห์ม 0.1-dB Ripple

วิธีทำ ใช้สมการ 7.1 และ 7.2 คำนวณค่าองค์ประกอบต่อไปนี้

$$C_1 = \frac{3.546}{2\pi(50 \times 10^6)(250)} = 45 \text{ pF}$$

$$C_3 = \frac{9.127}{2\pi (50 \times 10^6)(250)} = 116 \text{ pF}$$

$$C_5 = \frac{7.889}{2\pi (50 \times 10^6)(250)} = 100 \text{ pF}$$

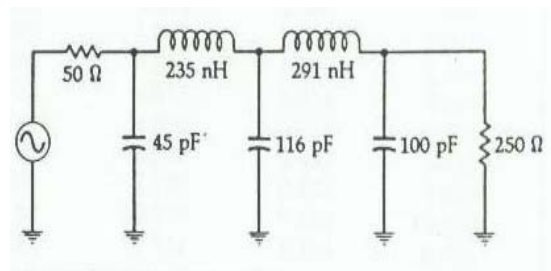
$$L_2 = \frac{(250)(0.295)}{2\pi (50 \times 10^6)} = 235 \text{ nH}$$

$$L_4 = \frac{(250)(0.366)}{2\pi (50 \times 10^6)} = 291 \text{ nH}$$

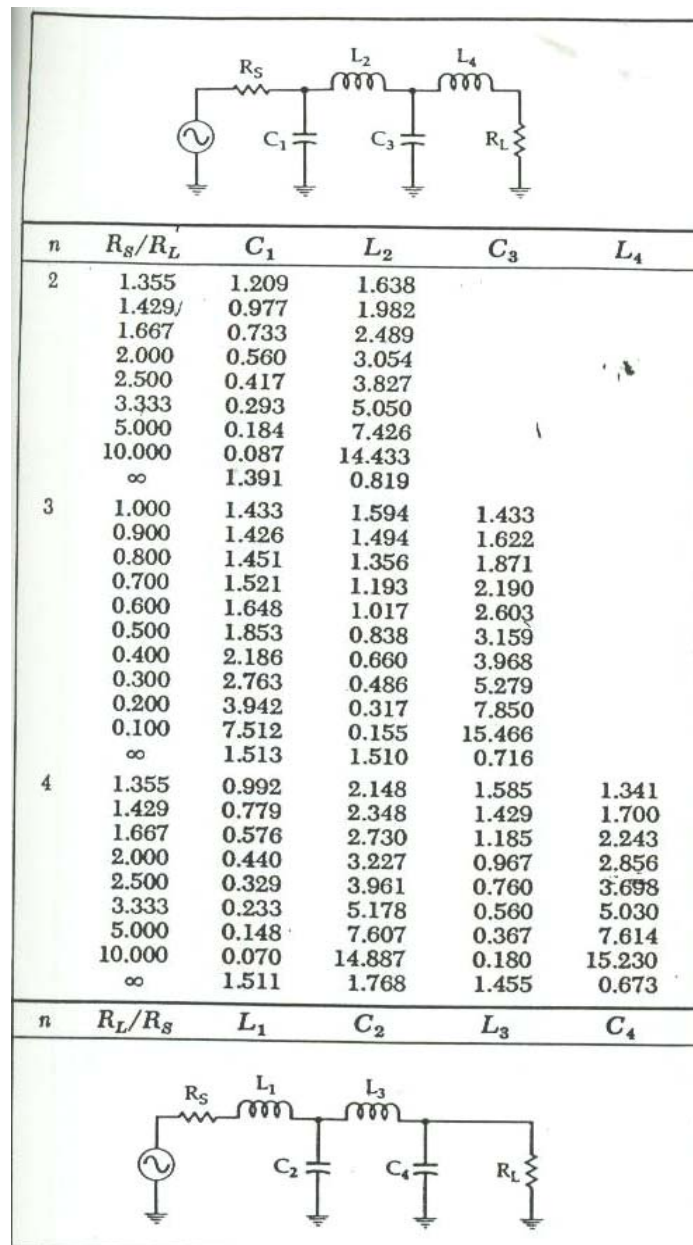
หาค่า  $R_s$  จากผลคูณของ ค่า normalize และค่าสุดท้ายของ  $R_L$

$$R_s(\text{final}) = 0.2(250) = 50 \text{ โอห์ม}$$

วงจรสุดท้ายที่ได้ ตามรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 วงจร low-pass filter สำหรับตัวอย่างที่ 7.1

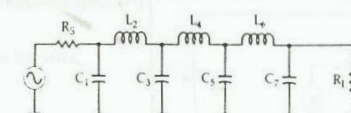


ตาราง 7.1A. Chebyshev Low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.1-dB Ripple

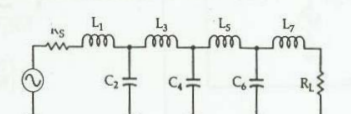
### การออกแบบ HIGH-PASS FILTER

เมื่อเรียนรู้การออกแบบ low-pass filter แล้ว high-pass filter ก็เป็นเรื่องที่ง่าย เราสามารถนำ เส้นโค้ง การลดทอนมาใช้ได้โดยการกลับค่าแทน  $f/f_c$  ของ low-pass filter ตัวอย่างเช่นที่  $n=5$ , 0.1-dB-ripple chebyshev low-pass filter จะได้ค่าการลดทอน 60dB ที่  $f/f_c = 3$  แต่เมื่อนำไปใช้กับ high-pass filter แล้ว ขนาดและชนิดจะเหมือนกัน ดังตัวอย่าง 7.2 สามารถบอกได้ว่าค่า  $f/f_c$  จะเป็น  $1/3$  (หรือ  $f_c/f = 3$ ) ที่  $n=5$ , 0.1-dB-ripple chebyshev ของ high-pass filter จะมีการลดทอน ที่ 60 dB เช่นกัน จะเห็นว่าวิธีนี้สะดวกกว่าที่ต้องกำหนดค่า เส้นโค้ง ขึ้นใหม่

หลังจากหาค่าการตอบสนองที่คาดไว้ขั้นตอนต่อไปหาค่าจากตาราง low-pass มุลฐาน แล้วนำมาใช้หาค่าของ high-pass จะได้มาโดยตรงจาก low-pass มุลฐาน ตามที่กล่าวมา



n	$R_S/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	1.301	1.556	2.241	1.556	1.301		
	0.900	1.285	1.433	2.380	1.488	1.488		
	0.800	1.300	1.282	2.582	1.382	1.738		
	0.700	1.358	1.117	2.868	1.244	2.062		
	0.600	1.470	0.947	3.269	1.085	2.484		
	0.500	1.654	0.778	3.845	0.913	3.055		
	0.400	1.954	0.612	4.720	0.733	3.886		
	0.300	2.477	0.451	6.196	0.550	5.237		
	0.200	3.546	0.295	9.127	0.366	7.889		
	0.100	6.787	0.115	17.957	0.182	15.745		
	$\infty$	1.561	1.807	1.766	1.417	0.651		
6	1.355	0.942	2.080	1.659	2.247	1.534	1.277	
	1.429	0.735	2.249	1.454	2.544	1.405	1.629	
	1.667	0.542	2.600	1.183	3.064	1.185	2.174	
	2.000	0.414	3.068	0.958	3.712	0.979	2.794	
	2.500	0.310	3.765	0.749	4.651	0.778	3.645	
	3.333	0.220	4.927	0.551	6.195	0.580	4.996	
	5.000	0.139	7.250	0.361	9.261	0.384	7.618	
	10.000	0.067	14.220	0.178	18.427	0.190	15.350	
	$\infty$	1.534	1.884	1.831	1.749	1.394	0.638	
7	1.000	1.262	1.520	2.239	1.680	2.239	1.520	1.262
	0.900	1.242	1.395	2.361	1.578	2.397	1.459	1.447
	0.800	1.255	1.245	2.548	1.443	2.624	1.362	1.697
	0.700	1.310	1.083	2.819	1.283	2.942	1.233	2.021
	0.600	1.417	0.917	3.205	1.209	3.384	1.081	2.444
	0.500	1.595	0.753	3.764	0.928	4.015	0.914	3.018
	0.400	1.885	0.593	4.618	0.742	4.970	0.738	3.855
	0.300	2.392	0.437	6.054	0.556	6.509	0.557	5.217
	0.200	3.428	0.286	8.937	0.369	9.770	0.372	7.890
	0.100	6.570	0.141	17.603	0.184	19.376	0.186	15.813
	$\infty$	1.575	1.858	1.921	1.827	1.734	1.379	0.631



ตาราง 7.1-B. Chebyshev low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.1-dB Ripple

## ตัวอย่าง 7.2

จงออกแบบ low-pass filter จากค่าที่กำหนดให้  $f_c = 35$  MHz ค่าการตอบสนองต้องมากกว่า 60dB ที่ 105 MHz ไม่มี ripple

$$R_S = 50 \text{ โอห์ม}$$

$$R_L = 500 \text{ โอห์ม}$$

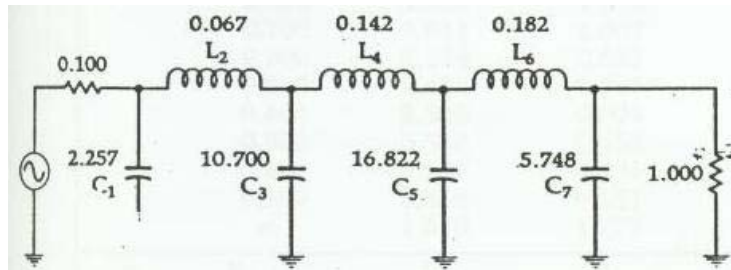
วิธีทำ ขั้นตอนแรกทำการหาค่า normalize โดย

$$R_S / R_L = 50/500$$

ขั้นตอนต่อไป ความถี่ normalize ที่สนใจ ดังนั้นเราจะได้

$$f_{60 \text{ dB}} / f_{3 \text{ dB}} = 105 \text{ MHz} / 35 \text{ MHz} = 3$$

เมื่อเราพิจารณาค่าการตอบสนองที่น้อยที่สุดที่ 60dB ค่า ratio ของ  $f/f_c = 3$  จากจะได้องค์ประกอบน้อยที่สุดคือ 7 จะมีค่าการลดทอนเฉพาะ แล้วนำค่า low-pass มูลฐาน มาคำนวณค่าของวงจร รูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 วงจรมูลฐานของ lowpass สำหรับตัวอย่าง 7.2

ใช้สมการ 7.1 และ 7.2 คำนวณ จะแสดงการหาค่า 2 ค่า

$$C_1 = \frac{2.257}{2\pi (35 \times 10^6)(500)} = 21 \text{ pF}$$

$$L_2 = \frac{(500)(0.067)}{2\pi (35 \times 10^6)} = 152 \text{ nH}$$

$$L_2 = \frac{(500)(0.067)}{2\pi (35 \times 10^6)} = 152 \text{ nH}$$

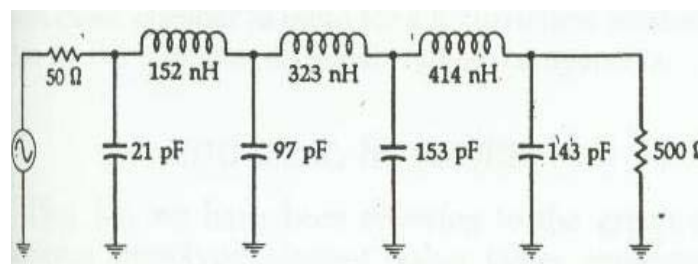
$$2\pi (35 \times 10^6)$$

ค่าที่คำนวณได้ดังต่อไปนี้

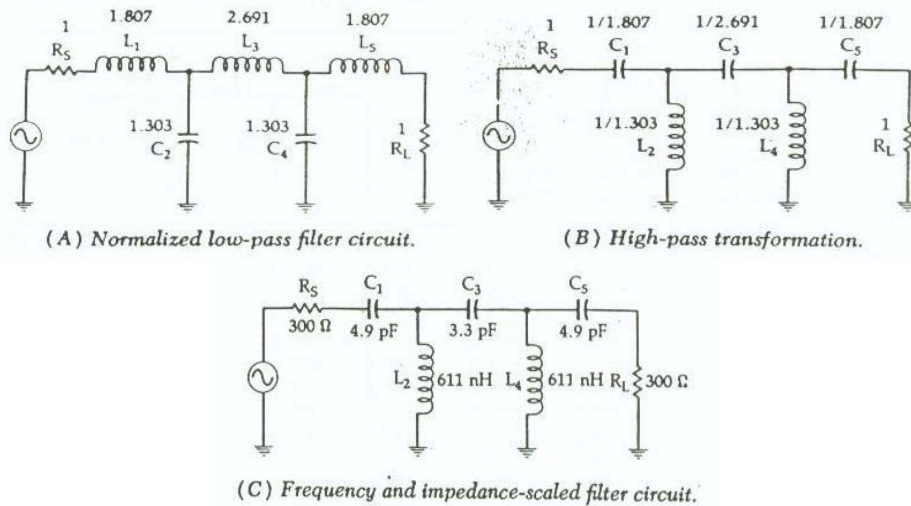
$$C_3 = 97 \text{ pF}, \quad C_5 = 153 \text{ pF}, \quad C_7 = 143 \text{ pF}, \quad L_4 = 323 \text{ nH}$$

$$L_6 = 414 \text{ nH}, \quad R_s = 50 \text{ โอห์ม}, \quad R_L = 500 \text{ โอห์ม}$$

วงจรสุดท้ายจะแสดงใน รูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 วงจรมูลฐานของ lowpass สำหรับตัวอย่าง 7.2



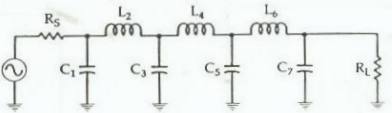
รูปที่ 7.5 การออกแบบ high pass filter สำหรับตัวอย่าง 3.2

$n$	$R_S/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	1.984	0.983	1.950		
	2.000	0.909	2.103		
	2.500	0.564	3.165		
	3.333	0.375	4.411		
	5.000	0.228	6.700		
	10.000	0.105	13.322		
	$\infty$	1.307	0.975		
3	1.000	1.864	1.280	1.834	
	0.900	1.918	1.209	2.026	
	0.800	1.997	1.120	2.237	
	0.700	2.114	1.015	2.517	
	0.500	2.557	0.759	3.436	
	0.400	2.985	0.615	4.242	
	0.300	3.729	0.463	5.576	
	0.200	5.254	0.309	8.225	
	0.100	9.890	0.153	16.118	
	$\infty$	1.572	1.518	0.932	
4	1.984	0.920	2.586	1.304	1.826
	2.000	0.845	2.720	1.238	1.985
	2.500	0.516	3.766	0.869	3.121
	3.333	0.344	5.120	0.621	4.480
	5.000	0.210	7.708	0.400	6.987
	10.000	0.098	15.352	0.194	14.262
	$\infty$	1.436	1.889	1.521	0.913
$n$	$R_L/R_S$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$

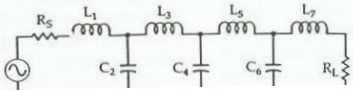
ตารางที่ 7.2A Chebyshev Low-Pass มูลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.5-dB Ripple  
 ทำการแทนที่ส่วนของ filter ด้วยจำนวนตรงข้าม เช่น  $L_1$  ใน รูปที่ 7.5B จะเท่ากับ  $1/C_1$  ของ  
 รูปที่ 7.5A ซึ่งเหมือนกับ  $C_2=1/L_2$  และ  $L_3=1/C_3$

ถ้ากำหนด low-pass มุลฐาน มาให้โดยมีค่าตัวเก็บประจุ  $=1.181\text{F}$  ดังนั้นจะได้ค่า  $L = 1/1.181 = 0.847\text{H}$  ไปใช้ในการออกแบบ High-pass อย่างไรก็ตามค่า  $R_s$  และ  $R_L$  ควรจะไม่เปลี่ยนแปลง

ผลของการแปลงคุณลักษณะการลดทอนของ High-pass filter เหมือนกระจกที่สะท้อนภาพคุณลักษณะของ low-pass filter Ripple ถ้าเกิดการเหลือค้ำจะเป็นค่าความชันของ stopband (หรือ Passband)



n	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	1.807	1.303	2.691	1.303	1.807		
	0.900	1.854	1.222	2.849	1.238	1.970		
	0.800	1.926	1.126	3.060	1.157	2.185		
	0.700	2.035	1.015	3.353	1.058	2.470		
	0.600	2.200	0.890	3.765	0.942	2.861		
	0.500	2.457	0.754	4.367	0.810	3.414		
	0.400	2.870	0.609	5.296	0.664	4.245		
	0.300	3.588	0.459	6.871	0.508	5.625		
	0.200	5.064	0.306	10.054	0.343	8.367		
	0.100	9.556	0.153	19.647	0.173	16.574		
	$\infty$	1.630	1.740	1.922	1.514	0.903		
6	1.984	0.905	2.577	1.368	2.713	1.299	1.796	
	2.000	0.830	2.704	1.291	2.872	1.237	1.956	
	2.500	0.506	3.722	0.890	4.109	0.881	3.103	
	3.333	0.337	5.055	0.632	5.699	0.635	4.481	
	5.000	0.206	7.615	0.406	8.732	0.412	7.031	
	10.000	0.096	15.186	0.197	17.681	0.202	14.433	
7	1.000	1.790	1.296	2.718	1.385	2.718	1.296	1.790
	0.900	1.835	1.215	2.869	1.308	2.883	1.234	1.953
	0.800	1.905	1.118	3.076	1.215	3.107	1.155	2.168
	0.700	2.011	1.007	3.364	1.105	3.416	1.058	2.455
	0.600	2.174	0.882	3.772	0.979	3.852	0.944	2.848
	0.500	2.428	0.747	4.370	0.838	4.289	0.814	3.405
	0.400	2.835	0.604	5.295	0.685	5.470	0.669	4.243
	0.300	3.546	0.455	6.867	0.522	7.134	0.513	5.635
	0.200	5.007	0.303	10.049	0.352	10.496	0.348	8.404
	0.100	9.456	0.151	19.649	0.178	20.631	0.176	16.665
	$\infty$	1.646	1.777	2.031	1.789	1.924	1.503	0.895



n	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$
5	1.000	1.807	1.303	2.691	1.303	1.807		
	0.900	1.854	1.222	2.849	1.238	1.970		
	0.800	1.926	1.126	3.060	1.157	2.185		
	0.700	2.035	1.015	3.353	1.058	2.470		
	0.600	2.200	0.890	3.765	0.942	2.861		
	0.500	2.457	0.754	4.367	0.810	3.414		
	0.400	2.870	0.609	5.296	0.664	4.245		
	0.300	3.588	0.459	6.871	0.508	5.625		
	0.200	5.064	0.306	10.054	0.343	8.367		
	0.100	9.556	0.153	19.647	0.173	16.574		
	$\infty$	1.630	1.740	1.922	1.514	0.903		
6	1.984	0.905	2.577	1.368	2.713	1.299	1.796	
	2.000	0.830	2.704	1.291	2.872	1.237	1.956	
	2.500	0.506	3.722	0.890	4.109	0.881	3.103	
	3.333	0.337	5.055	0.632	5.699	0.635	4.481	
	5.000	0.206	7.615	0.406	8.732	0.412	7.031	
	10.000	0.096	15.186	0.197	17.681	0.202	14.433	
7	1.000	1.790	1.296	2.718	1.385	2.718	1.296	1.790
	0.900	1.835	1.215	2.869	1.308	2.883	1.234	1.953
	0.800	1.905	1.118	3.076	1.215	3.107	1.155	2.168
	0.700	2.011	1.007	3.364	1.105	3.416	1.058	2.455
	0.600	2.174	0.882	3.772	0.979	3.852	0.944	2.848
	0.500	2.428	0.747	4.370	0.838	4.289	0.814	3.405
	0.400	2.835	0.604	5.295	0.685	5.470	0.669	4.243
	0.300	3.546	0.455	6.867	0.522	7.134	0.513	5.635
	0.200	5.007	0.303	10.049	0.352	10.496	0.348	8.404
	0.100	9.456	0.151	19.649	0.178	20.631	0.176	16.665
	$\infty$	1.646	1.777	2.031	1.789	1.924	1.503	0.895

ตารางที่ 7.2B Chebyshev Low-Pass มุลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 0.5-dB Ripple

ดังตัวอย่างที่ 7.2 เป็นการออกแบบ high-pass filter เมื่อสังเกตการออกแบบของตัวอย่างที่ 7.2 แสดงให้เห็นว่ากราฟที่ได้จะมีความสมมาตรกัน ในความเป็นจริงแล้ว filter จะให้ค่าสุดท้ายที่สมมาตรกัน การสมมาตรกันนี้จะทำให้การออกแบบวงจรง่ายขึ้นโดยโจทย์จะให้ high-volume product โดยกำหนดค่าองค์ประกอบมาให้

#### BANDPASS FILTER DESIGN

วงจร Lowpass มุลฐาน และ เส้นโค้ง การตอบสนองนี้ จะเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปอย่างง่าย ๆ คล้ายกับใน กรณีของ high-pass วิธีสำหรับการหาวงจรแสดงโดย เส้นโค้ง ในรูป 7.5 เมื่อออกแบบ lowpass แล้วจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นการออกแบบ Band pass สัดส่วน bandwidth การ



ลดทอนจะคล้ายกัน ซึ่งหมายถึง low pass filter ที่ความถี่ cutoff 3-dB หรือ Bandwidth 2kHz จะเปลี่ยนไปเป็น Band pass filter ที่ 3-dB Bandwidth 2 kHz ถ้าการตอบสนองของ โครงข่าย low pass ลดลง 30 dB ที่ความถี่ หรือ Bandwidth 4 kHz ดังนั้น แกน  $f/f_c$  ของ เส้นโค้งs การลดทอน low pass จะกลายเป็น อัตราส่วน Bandwidth ที่มากกว่าความถี่ ดังเช่น

$$BW / BW_c = f / f_c \quad (\text{สมการ 7.3})$$

โดยที่  $BW$  = ค่า Bandwidth ที่ต้องการ ของ การลดทอน

$BW_c$  = 3-dB Bandwidth ของ Band pass filter

บ่อยครั้งที่ Band pass response ไม่ถูกระบุ ดังเช่นในตัวอย่างที่ 7.2 ซึ่งต้องการให้ค่าการลดทอนที่ความถี่ที่เจาะจง เราจะต้องหา  $f_3$  ก่อน ซึ่งใช้วิธีดังต่อไปนี้

การตอบสนองทางความถี่ของ bandpass Filter จะแสดงเป็นสัดส่วนทางเรขาคณิตมันคือ สัดส่วนเดียวกันเมื่อพลอตลงบนกราฟ log ค่าความถี่กลางของ filter หาได้โดยสูตร

$$f_0 = \sqrt{(f_a f_b)} \quad (\text{สมการ 7.4})$$

เมื่อ  $f_a, f_b$  คือค่าความถี่ใด ๆ (ค่าหนึ่งสูงกว่าและค่าหนึ่งต่ำกว่า passband) มีค่าการลดทอนเท่ากัน ดังนั้น ค่าความถี่กลางของกราฟการตอบสนอง ที่แสดงใน รูป 7.28 จะได้

$$f_0 = \sqrt{(45)(75) \text{ MHz}} = 58.1 \text{ MHz}$$

เราสามารถใส่สมการ 7.4 อีกครั้งเพื่อหา  $f_3$

$$58.1 = \sqrt{f_3(125)} \quad \text{or} \quad f_3 = 27 \text{ MHz}$$

ขณะนี้เราทราบค่า  $f_3$  แล้ว ข้อมูลของรูป 7.28 สามารถนำไปแทนในสมการ 7.3 ได้

$$\frac{BW_{40\text{dB}}}{BW_{3\text{dB}}} = \frac{125\text{MHz} - 27\text{MHz}}{75\text{MHz} - 45\text{MHz}} = 3.27$$

เพื่อที่จะหากราฟ Lowpass มूलฐาน ที่จะเป็นไปตามความต้องการ จะต้องอ้างอิงจากกราฟที่แสดงในบทนี้และหาการตอบสนองที่จะให้ค่าการลดทอนเป็น 40 dB ที่  $f/f_c$  เป็น 3.27

### ตัวอย่าง 7.3

ออกแบบ LC highpass filter ที่  $f_c = 60 \text{ MHz}$  ค่าการลดทอนน้อยที่สุด 40 dB ที่ 30 MHz แหล่งจ่าย และโหลด มีค่า 300 โอห์ม 0.5dB passband ripple

วิธีทำ ขั้นแรก normalize ค่าการลดทอนที่ต้องการ

$$f / f_c = 30 \text{ MHz} / 60 \text{ MHz} = 0.5$$

เมื่อกลับค่า จะได้  $(f_c / f) = 2$

ขณะนี้เลือก normalize lowpass filter โดยให้ค่าการลดทอนน้อยที่สุด 40 dB ที่  $f_c / f = 2$  จากการตอบสนองการลดทอนของ 0.5 dB ripple Chebyshev filter normalize  $n=5$  จะได้ การลดทอนที่ต้องการ ตาราง 7.2 มีค่าส่วนประกอบของ network ที่คล้ายกัน ทำการ normalize วงจร lowpass เดิมที่แสดงในรูป 7.5A รูปแบบข้างล่างตาราง 7.2B ถูกเลือกเป็นวงจร lowpass มूलฐาน มากกว่ารูป



แบบข้างบน เหตุผลสำหรับการทำขื่อนี้จะเริ่มชัดเจนในขั้นตอนต่อไป อย่างไรก็ตาม  $R_S/R_L$  จะมีค่าเหมือนกันกับ  $R_L/R_S$  ดังนั้นมันจึงไม่ส่งผลใด ๆ ต่อการใช่วงจรแบบเดิม

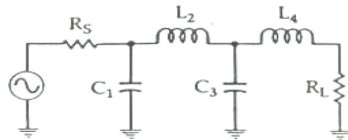
ขั้นตอนต่อไป เปลี่ยนรูปวงจร lowpass ไปเป็น highpass โดยการชดเชยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ แล้วทำการกลับกันใช้ค่าส่วนกลับดังรูป 7.5B การเปลี่ยนรูปนี้จะได้ filter ที่มีตัวเหนี่ยวนำ 3 ตัว ดังแสดงใน 7.5B

ขั้นตอนสุดท้าย คือ ใช้สมการ 7.12 และ 7.13

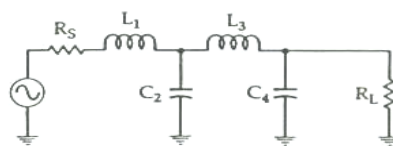
$$C_1 = \frac{(1/1.807)}{2\pi (60\text{MHz})(300)} = 4.9\text{pF} \quad , \quad L_2 = \frac{300(1/1.303)}{2\pi (60\text{MHz})} = 611\text{ nH}$$

ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้คือ

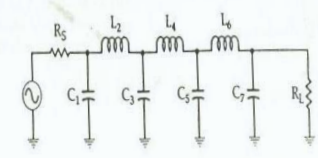
$C_3 = 3.3\text{pF}$  ,  $C_5 = 4.9\text{pF}$  ,  $L_4 = 611\text{nH}$  วงจรฟิวเตอร์สุดท้ายแสดงในรูป 7.5C



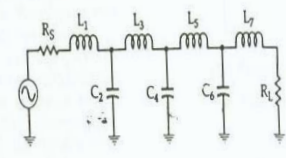
$n$	$R_S/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$
2	3.000	0.572	3.132		
	4.000	0.365	4.600		
	8.000	0.157	9.658		
	$\infty$	1.213	1.109		
3	1.000	2.216	1.088	2.216	
	0.500	4.431	0.817	2.216	
	0.333	6.647	0.726	2.216	
	0.250	8.862	0.680	2.216	
	0.125	17.725	0.612	2.216	
	$\infty$	1.652	1.460	1.108	
4	3.000	0.653	4.411	0.814	2.535
	4.000	0.452	7.083	0.612	2.848
	8.000	0.209	17.164	0.428	3.281
	$\infty$	1.350	2.010	1.488	1.106
$n$	$R_L/R_S$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$



ตาราง 7.3A Chebyshev Low-Pass มูลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 1.0-dB Ripple



n	$R_s/R_L$	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$
5	1.000	2.207	1.128	3.103	1.128	2.207		
	0.500	4.414	0.565	4.653	1.128	2.207		
	0.333	6.622	0.376	6.205	1.128	2.207		
	0.250	8.829	0.282	7.756	1.128	2.207		
	0.125	17.657	0.141	13.961	1.128	2.207		
	$\infty$	1.721	1.645	2.061	1.493	1.103		
6	3.000	0.679	3.873	0.771	4.711	0.969	2.406	
	4.000	0.481	5.644	0.476	7.351	0.849	2.582	
	8.000	0.227	12.310	0.198	16.740	0.726	2.800	
	$\infty$	1.378	2.097	1.690	2.074	1.494	1.102	
7	1.000	2.204	1.131	3.147	1.194	3.147	1.131	2.204
	0.500	4.408	0.566	6.293	0.895	3.147	1.131	2.204
	0.333	6.612	0.377	9.441	0.796	3.147	1.131	2.204
	0.250	8.815	0.283	12.588	0.747	3.147	1.131	2.204
	0.125	17.631	0.141	25.175	0.671	3.147	1.131	2.204
	$\infty$	1.741	1.677	2.155	1.703	2.079	1.494	1.102

n	$R_L/R_s$	$L_1$	$C_2$	$L_3$	$C_4$	$L_5$	$C_6$	$L_7$
---	-----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ตาราง 7.3B Chebyshev Low-Pass มวลฐาน ที่องค์ประกอบต่างๆ สำหรับ 1.0-dB Ripple  
สูตรสำหรับ Parallel-resonant branches

$$C = \frac{C_n}{2\pi RB} \quad (\text{สมการ 7.5})$$

$$L = \frac{RB}{2\pi f_0^2 L_n} \quad (\text{สมการ 7.6})$$

และ สำหรับ series-resonant branches

$$C = \frac{B}{2\pi f_0^2 C_n R} \quad (\text{สมการ 7.7})$$

$$L = \frac{RL_n}{2\pi B} \quad (\text{สมการ 7.8})$$

ซึ่งในทุกกรณี

$R$  = the final load อิมพีแดนซ์

$B$  = the 3-dB bandwidth of the final design

$f_0$  = the geometric center frequency of the final design

$L_n$  = the normalize inductor bandpass element value

$C_n$  = the normalize capacitor bandpass element value

### สรุปกระบวนการออกแบบ Bandpass filter

1. เปลี่ยนรูป Bandpass ที่ต้องการ ไปเป็น lowpass ที่ต้องการ โดยใช้สมการ 7.3
2. อ้างอิงจากกราฟการลดทอน lowpass เพื่อที่จะหาการตอบสนองที่ต้องการใน ขั้นตอนแรก
3. หา Lowpass มूलฐาน ที่ตรงกันและเขียนลงในวงจร
4. เปลี่ยนรูป lowpass network ไปเป็น bandpass ที่ตั้งไว้
5. bandpass ที่ตั้งไว้ในทุก อิมพีแดนซ์ และความถี่ใช้ สมการ 7.5 ถึง 7.8

### BAND-REJECTION FILTER DESIGN

Band-rejection filter มีความใกล้เคียงกับการออกแบบ Bandpass filter โดยที่ Band-rejection filter ออกแบบโดยใช้กระบวนการเดียวกันที่ใช้ในการออกแบบ Bandpass ขั้นแรกกำหนด Bandstop ที่ต้องการในเทอมของกราฟการลดทอน lowpass ซึ่งกรณีนี้จะใช้ส่วนกลับของสมการ 7.3

$$BW_C / BW = (f_4 - f_1) / (f_3 - f_2)$$

จำนวนของ element ที่ต้องการในวงจร lowpass มूलฐาน จะถูกกำหนดโครงข่าย lowpass จะถูกเปลี่ยนไปเป็น band-reject configuration

ทุกวงจร shunt element ใน lowpass มूलฐาน จะถูกแทนที่โดยวงจร shunt series-resonant และ ทุก series element จะถูกแทนที่โดย วงจร series parallel-resonant

#### ตัวอย่าง 7.4

ออกแบบ bandpass filter ตามค่าที่ต้องการ

$$\begin{aligned} f_0 &= 75 \text{ MHz} & \text{Passband Ripple} &= 1 \text{ dB} \\ BW_{3\text{dB}} &= 7 \text{ MHz} & R_s &= 50 \text{ โอห์ม} \\ BW_{45\text{dB}} &= 35 \text{ MHz} & R_L &= 100 \text{ โอห์ม} & \text{ค่าการลดทอน } 50 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\text{วิธีทำ ใช้สมการ 7.3 } BW_{45\text{dB}} / BW_{3\text{dB}} = 35/7 = 5$$

ค่านี้ใช้แทน  $f/f_c$  ใน กราฟการลดทอน lowpass สำหรับ 1 dB ripple การตอบสนองแบบ Chebyshev ใช้ พิวเตอร์ 3 องค์ประกอบจะได้ค่าการลดทอน 50 dB ที่  $f/f_c = 5$  ค่าองค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับพิวเตอร์นี้สามารถหาในตาราง 7.3 สำหรับ  $R_s/R_L = 0.5$  และ  $n=3$  ผลที่ได้ของวงจร lowpass มूलฐาน ในรูป 7.7A เปลี่ยนไปเป็นวงจร Bandpass มूलฐาน ดังรูป 7.7 B ขั้นตอนสุดท้ายใช้สมการ 7.5 ถึง 7.8 วงจรสุดท้ายได้แสดงในรูป 7.7C เมื่อใช้สมการ 7.5 และ 7.6 จะได้

$$C_1 = \frac{4.431}{2\pi (100)(7 \times 10^6)} = 1007 \text{ pF} , \quad L_1 = \frac{(100)(7 \times 10^6)}{2\pi (75 \times 10^6)^2 (4.431)} = 4.47 \text{ nH}$$

ใช้สมการ 7.7 และ 7.8

$$C_2 = \frac{7 \times 10^6}{2\pi (7 \times 10^6)^2 (0.817) 100} = 2.4 \text{ pF} \quad , \quad L_2 = \frac{(100)(0.817)}{2\pi (7 \times 10^6)} = 1.86 \text{ } \mu\text{H}$$

เมื่อใช้วิธีเดียวกันจะได้

$$C_3 = 504 \text{ pF} \quad , \quad L_3 = 8.93 \text{ nH}$$

สิ่งที่แสดงในรูปที่ 7.6 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบทั้งสองในแต่ละวงจรเรโซแนนซ์ ว่ามีการ Normalize เหมือนกัน

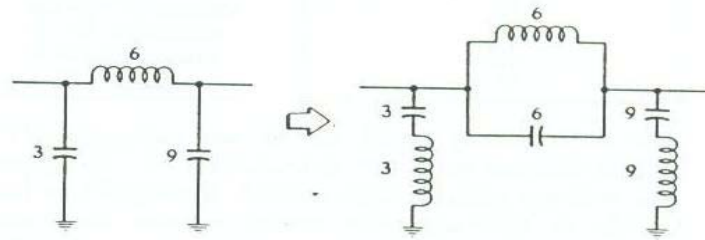


Fig. 3-31. Low-pass to band-reject transformation

รูปที่ 7.6 การแปลง low-pass ไปเป็น band reject filter

มูลฐาน circuit ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็น Band-reject configuration ค่า อิมพีแดนซ์ และ ความถี่ จะหาดังสูตรต่อไปนี้

สำหรับ Series-resonant circuit:

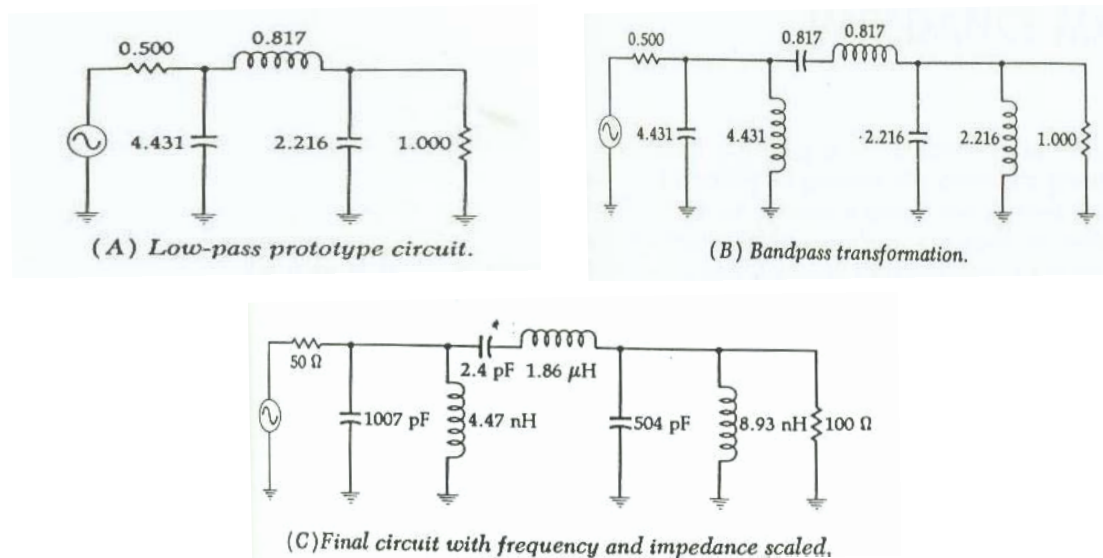
$$C = \frac{C_n}{2\pi R B} \quad (\text{สมการ 7.9})$$

$$L = \frac{R L_n}{2\pi f_0^2 R C_n} \quad (\text{สมการ 7.10})$$

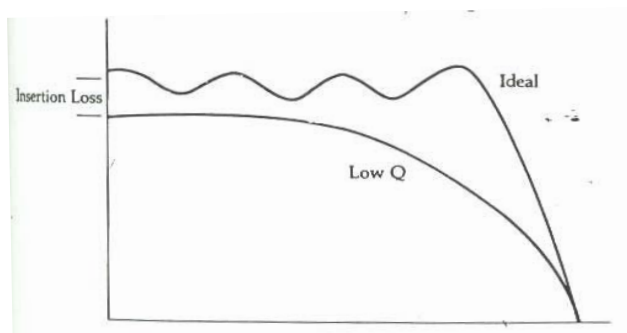
สำหรับ Parallel-resonant circuit:

$$C = \frac{B}{2\pi f_0^2 R C_n} \quad (\text{สมการ 7.11})$$

$$L = \frac{R L_n}{2\pi B} \quad (\text{สมการ 7.12})$$



รูปที่ 7.7 การออกแบบ Band pass filter สำหรับตัวอย่างที่ 7.4



รูปที่ 7.8 แสดงผลขององค์ประกอบที่มีการจำกัดค่า  $Q$  ในการตอบสนองของ filter

## บทที่ 8

### แอมพลิฟายเออร์ (AMPLIFIER)

แอมพลิฟายเออร์หรือตัวขยายเป็นวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้เพื่อเพิ่มแอมพลิจูดของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อมีวงจรซึ่งออกแบบเพื่อแปลงแรงดันต่ำให้กลายเป็นแรงดันสูงเรียกว่าวงจรนั้นว่าวงจรขยายแรงดัน หรือโวลต์เดจ แอมพลิฟายเออร์ (Voltage Amplifier) และวงจรที่ถูกออกแบบให้แปลงกระแสต่ำให้กลายเป็นกระแสสูงกว่า เรียกว่า วงจรขยายกระแส หรือเคอร์เร็นจ์ แอมพลิฟายเออร์ (Current Amplifier)

ทรานซิสเตอร์จะใช้เป็นตัวขยายที่สามารถรับสัญญาณอินพุตเข้าไปแล้วผลิตสัญญาณเอาต์พุตซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณอินพุตได้

#### การวัดอัตราขยาย

เป็นหน้าที่พื้นฐานของแอมพลิฟายเออร์และเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณที่เข้ามาในแอมพลิฟายเออร์กับสัญญาณที่ออกจากแอมพลิฟายเออร์ ตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณอินพุต 1 V สัญญาณเอาต์พุต 10V ดังนั้น

$$\text{อัตราขยาย} = \frac{\text{สัญญาณเอาต์พุต}}{\text{สัญญาณอินพุต}} = \frac{10V}{1V} = 10$$

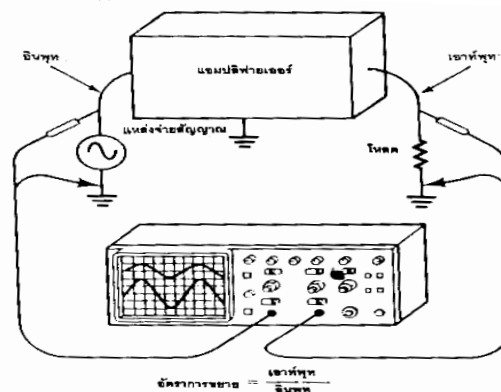
$$\text{สัญญาณอินพุต} \quad 1V$$

เราจะใช้อักษร A แทนอัตราขยาย หรือการขยายในอิเล็กทรอนิกส์ และมีตัวห้อยท้ายเพื่อบอกชนิดของอัตราขยาย

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

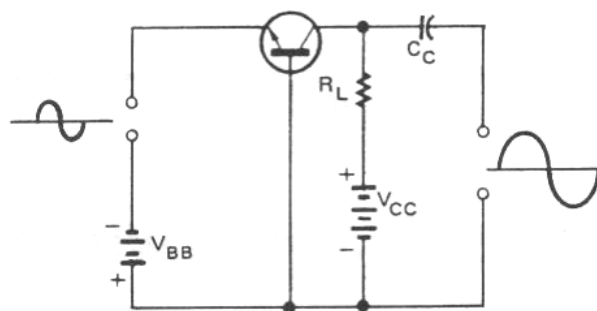
$$A_I = \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

$$A_P = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$



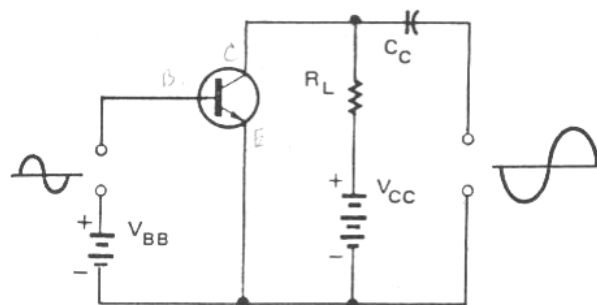
รูปที่ 8.1 การวัดอัตราขยาย

อัตราขยายแรงดัน( $A_v$ )ใช้ในการอธิบายการทำงานของแอมพลิฟายเออร์สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก และอัตราขยายกำลังใช้ในการอธิบายการทำงานของแอมพลิฟายเออร์สำหรับสัญญาณขนาดใหญ่ ถ้าแอมพลิฟายเออร์ในรูป 6.1 คือเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์สำหรับสัญญาณขนาดใหญ่เมื่อจะทำการขยายสัญญาณ โดยใช้ทรานซิสเตอร์ต่อวงจรขยายสัญญาณได้ 3 ลักษณะคือ วงจรคอมมอน อิมิตเตอร์ (Common Emitter) วงจรคอมมอน เบส (Common Base) และวงจรคอมมอน คอลเล็กเตอร์ (Common collector) โดยแต่ละแบบจะใช้ทรานซิสเตอร์เพียงหนึ่งตัว และใช้ขาของทรานซิสเตอร์เป็นจุดร่วมอ้างอิง เราจึงเรียกชื่อตามขาร่วมอ้างอิง ส่วนสองขาที่เหลือจะให้ขาของสัญญาณอินพุต และขาของสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งแต่ละรูปแบบสามารถสร้างได้จากทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ,NPN ก็ได้



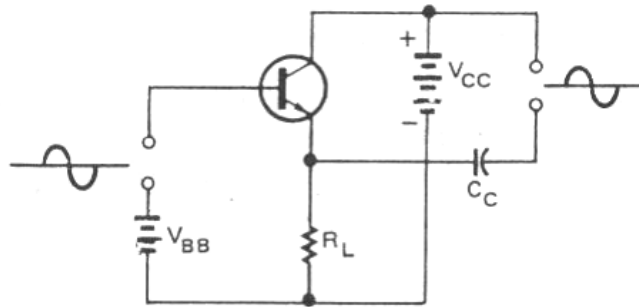
รูปที่ 8.2 วงจรขยายแบบคอมมอน เบส(Common base)

ในวงจรคอมมอนเบสจากรูปที่ 8.2 สัญญาณอินพุตจะเข้ามาที่ขาอิมิตเตอร์ โดยมีเบสเป็นกราวด์จุดร่วม และสัญญาณเอาต์พุตจะออกจากวงจรคอลเล็กเตอร์-เบส



รูปที่ 8.3 วงจรขยายแบบคอมมอน อิมิตเตอร์ (common emitter)

ในวงจรคอมมอน อิมิตเตอร์ จากรูปที่ 8.3 สัญญาณอินพุตจะเข้ามาทางวงจรเบส อิมิตเตอร์ และสัญญาณออกจะออกจากวงจรคอลเล็กเตอร์ อิมิตเตอร์ โดยมีอิมิตเตอร์เป็นจุดร่วมวงจรอินพุต และวงจรเอาต์พุต ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง



รูปที่ 8.4 วงจรขยายแบบคอมมอน คอลเล็กเตอร์ (Common collector)

การต่อแบบที่สาม แสดงดังรูปที่ 8.4 คือวงจรคอมมอนคอลเล็กเตอร์ สัญญาณอินพุตจะเข้าทางวงจรคอลเล็กเตอร์ และวงจรเอาต์พุตจะออกจากวงจรอิมิตเตอร์ คอลเล็กเตอร์ ในวงจรนี้จะมี คอลเล็กเตอร์เป็นจุดร่วมของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต วงจรนี้เป็นวงจรอิมพีแดนซ์การแมตช์ (Impedance Matching)

รูปที่ 8.5 เป็นตารางแสดงความต้านทานของอินพุต เอาต์พุต และแรงดัน, กระแส และอัตรา กำลังขยาย (Power Gain) สำหรับวงจรขยายทั้ง 3 แบบ และในรูป 8.6 แสดงถึงรูปคลื่นความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของอินพุต และเอาต์พุต สังเกตว่าคอมมอนอิมิตเตอร์จะให้เฟสกลับกันระหว่างสัญญาณอินพุต กับสัญญาณเอาต์พุต

CIRCUIT TYPE	INPUT RESISTANCE	OUTPUT RESISTANCE	VOLTAGE GAIN	CURRENT GAIN	POWER GAIN
COMMON BASE	LOW	HIGH	HIGH	LESS THAN 1	MEDIUM
COMMON EMITTER	MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM	MEDIUM	HIGH
COMMON COLLECTOR	HIGH	LOW	LESS THAN 1	MEDIUM	MEDIUM

รูปที่ 8.5 คุณสมบัติของวงจรขยาย

AMPLIFIER TYPE	INPUT WAVEFORM	OUTPUT WAVEFORM
COMMON BASE		
COMMON EMITTER		
COMMON COLLECTOR		

รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ของเฟสอินพุต-เอาต์พุต ของวงจรขยาย

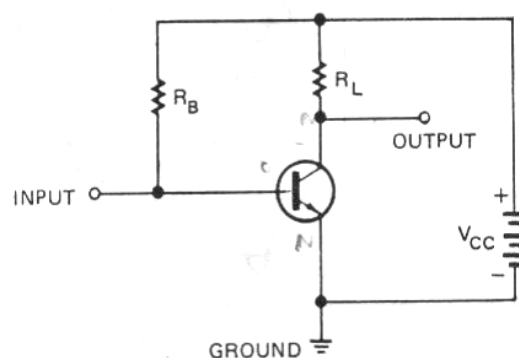


## การไบอัสแอมพลิฟายเออร์

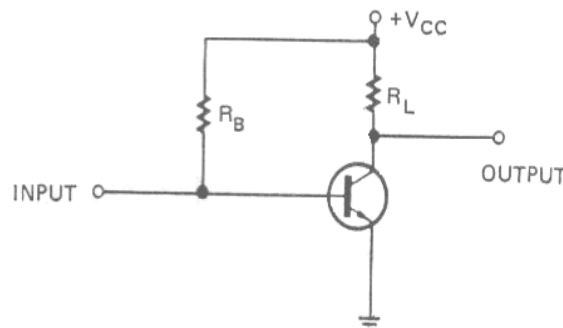
รูปแบบโดยทั่วไปของวงจรขยายทรานซิสเตอร์ คือ วงจรคอมมอน เบส, วงจรคอมมอน อิมิตเตอร์ และคอมมอน คอลเล็กเตอร์ ซึ่งทั้งหมดนี้ต้องการแรงดันไบอัส 2 แหล่ง โดยที่จังก์ชัน เบส-อิมิตเตอร์ต้องได้รับแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดไบอัส และจังก์ชันเบส คอลเล็กเตอร์ ต้องได้รับแรงดันแบบรีเวิร์ดไบอัส อย่างไรก็ตามแรงดันไบอัสทั้งสองสามารถจ่ายได้จากแหล่งจ่ายเพียงตัวเดียว

เพราะว่าโดยทั่วไปจะใช้วงจรคอมมอน อิมิตเตอร์ ซึ่งหลักการโดยทั่วไปจะเหมือนกับคอมมอน เบส และคอมมอนคอลเล็กเตอร์ เราจึงนำคอมมอน อิมิตเตอร์มาอธิบายโดยละเอียดในที่นี้

รูปที่ 8.7 แสดงวงจรขยายทรานซิสเตอร์แบบคอมมอน อิมิตเตอร์ ซึ่งใช้แหล่งจ่ายแรงดันเพียงแหล่งจ่ายเดียว รูปแบบไดอะแกรมของวงจรแสดงในรูปที่ 8.8 แหล่งจ่ายแรงดันกำหนดให้เป็น  $+V_{cc}$  สัญลักษณ์กราวด์ คือ ปลายของแหล่งจ่ายแรงดัน  $+V_{cc}$  แหล่งจ่ายแรงดันเดียวจะทำให้การไบอัสที่เหมาะสมแก่จังก์ชันเบส-อิมิตเตอร์ และจังก์ชันเบส คอลเล็กเตอร์ ตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_L$  ใช้เพื่อกระจายแรงดันให้เหมาะสมกับการทำงาน โดยที่ตัวต้านทาน  $R_L$  คือตัวต้านทานโหลดของคอลเล็กเตอร์นั่นเอง เมื่อกระแสคอลเล็กเตอร์ไหลจะเกิดแรงดันตกคร่อม  $R_L$  และตกคร่อมจังก์ชันคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ด้วย



รูปที่ 8.7 วงจรขยายแบบคอมมอนอิมิตเตอร์พร้อมกับแหล่งจ่ายแรงดันเดียว



รูปที่ 8.8 แสดงไดอะแกรมของวงจรขยายคอมมอนอิมิตเตอร์  
พร้อมกับแหล่งจ่ายแรงดันเดียว

ตัวต้านทาน  $R_B$  ซึ่งต่ออยู่ระหว่างเบสและแหล่งจ่ายแรงดัน จะใช้ตัวควบคุมปริมาณกระแส ซึ่งจะนำไปไบอัสแก่เบส กระแสเบสจะไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมัน และแรงดันส่วนใหญ่จากแหล่งจ่ายจะตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_B$  ด้วยจะมีแรงดันปริมาณน้อยเท่านั้นที่จะตกคร่อมอยู่ที่จังก์ชันเบส-อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดการเหมาะสมของการไบอัส

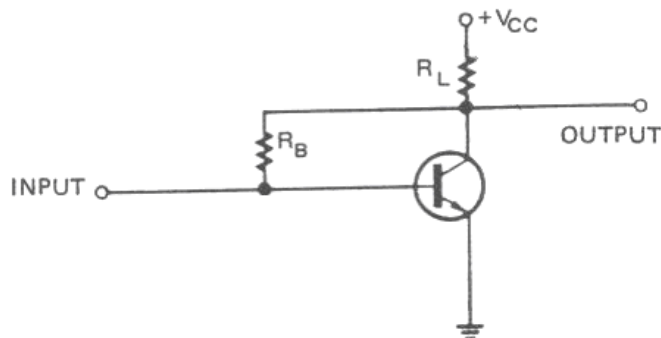
แหล่งจ่ายแรงดันเดียวสามารถจ่ายแรงดันฟอเวิร์ดและแรงดันรีเวิร์ด ได้สำหรับ ทรานซิสเตอร์ชนิดNPN เบสและคอลเล็กเตอร์ต้องมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับอิมิตเตอร์ ดังนั้นแรงดันจากแหล่งจ่ายสามารถต่อกับเบสและคอลเล็กเตอร์ โดยผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_L$  วงจรนี้บ่อยครั้งจะถูกเรียกววงจรเบสไบอัส เพราะว่ากระแสเบสถูกควบคุมด้วยตัวต้านทาน  $R_B$  และแหล่งจ่ายแรงดัน

สัญญาณอินพุตถูกจ่ายระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ หรือระหว่างขั้วอินพุตกับกราวด์ สัญญาณอินพุตจะเป็นแรงดันฟอเวิร์ดไบอัสที่เหมาะสมคร่อมที่จังก์ชันอิมิตเตอร์ เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเล็กเตอร์ ซึ่งหลังจากนั้นจะทำให้เกิดแรงดันที่ตกคร่อม  $R_L$  เกิดการเปลี่ยนแปลงจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ขั้วเอาต์พุตกับกราวด์

วงจรที่แสดงในรูป8.7 จะขาดการเสถียร เพราะมันไม่สามารถชดเชย การเปลี่ยนแปลงกระแสเบสขณะไม่มีสัญญาณจ่ายเข้ามาได้ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเป็นเหตุอย่างหนึ่งซึ่งทำให้ความต้านทานภายในของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลง เป็นผลให้กระแสไบอัสเปลี่ยนตามไปด้วย และทำงานของทรานซิสเตอร์เกิดการเลื่อน อัตราขยายของทรานซิสเตอร์ลดลง ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมานี้เรียกว่า ความไม่เสถียรเนื่องจากอุณหภูมิ

ในการชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในวงจรขยายทรานซิสเตอร์นั้น ถ้านำสัญญาณเอาต์พุตในส่วนที่ไม่ต้องการไปป้อนกลับให้แก่วงจรอินพุต สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม ซึ่งเรียกว่า ดิเจนเนอเรทิฟ หรือเนกทิฟฟีดแบค ดังแสดงในรูป8.9 ในวงจรที่มีการใช้ดิเจนเนอเรทิฟ ฟีดแบค ตัวต้านทานเบส  $R_B$  จะถูกนำไปต่อโดยตรงกับคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์

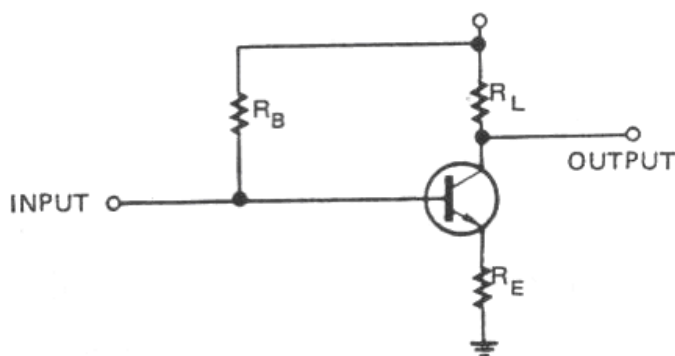
กระแสจะไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  และมีแรงดันตกคร่อมที่  $R_B$  ด้วย ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น กระแสคอลเล็กเตอร์ก็จะเพิ่มตามไปด้วย และแรงดันที่ตกคร่อม  $R_L$  จะเพิ่มขึ้น ส่วนแรงดันคอลเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์จะลดลง และแรงดันที่จ่ายไปยัง  $R_B$  ก็ลดลงตามไปด้วย เป็นผลให้มีการลดกระแสเบสขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์ลดลงในที่สุด ซึ่งการทำเช่นนี้เราเรียกว่าวงจรคอลเล็กเตอร์ ฟีดแบค



รูปที่ 8.9 วงจรขยายคอมมอน-อิมิตเตอร์ พร้อมกับคอลเล็กเตอร์ไฟดแบค

รูปที่ 8.10 แสดงการไฟดแบคอีกแบบหนึ่ง ลักษณะวงจรก็คล้ายๆกัน กับรูปที่ 8.8 ยกเว้นว่ามีตัวต้านทาน  $R_E$  มาต่อที่ขาอิมิตเตอร์ ตัวต้านทาน  $R_B$  และ  $R_E$  และจังก์ชันอิมิตเตอร์-เบส ของทรานซิสเตอร์จะต่อกันในลักษณะอนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{CC}$

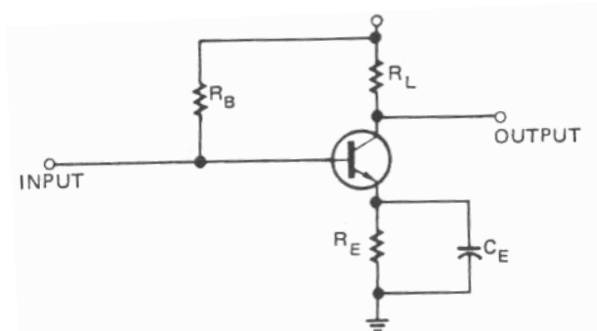
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นเหตุให้กระแสคอลเล็กเตอร์ไหลมากขึ้น หลังจากนั้นกระแสอิมิตเตอร์ก็จะไหลมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้แรงดันตกคร่อม  $R_E$  เพิ่มขึ้น และแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_B$  ลดลง ทำให้กระแสเบสไหลน้อยลง ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์และกระแสอิมิตเตอร์ไหลน้อยลงตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะผลของการ ไฟดแบคที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์นั่นเอง ดังนั้นวงจรนี้จึงถูกเรียกว่าวงจรอิมิตเตอร์ ไฟดแบค



รูปที่ 8.10 วงจรขยายแบบคอมมอน อิมิตเตอร์ พร้อมกับอิมิตเตอร์ไฟดแบค

มีปัญหาก็อีกแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นมาพร้อมสำหรับวงจรคอมมอน อิมิตเตอร์ พร้อมกับอิมิตเตอร์ไฟดแบค คือว่าเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นเอซี จ่ายแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  และตกคร่อมตัวต้านทานโหลด  $R_L$  รวมทั้งตัวทรานซิสเตอร์ด้วย ทำให้อัตราขยายทั้งหมดของวงจรลดลง ดังนั้นเราจึงเพิ่มตัวคาปาซิเตอร์คร่อมตัวต้านทานอิมิตเตอร์  $R_E$  ดังแสดงในรูป 8.11 สัญญาณ เอ ซี จะถูกบายพาส (bypass) ด้วยตัวคาปาซิเตอร์ ดังนั้นเราจึงเรียกตัวคาปาซิเตอร์นี้ว่า บายพาสคาปาซิเตอร์

บายพาสต์คาปาซิเตอร์ จะเป็นตัวป้องกันการเปลี่ยนแปลงแรงดันทันทีทันใดที่ปรากฏตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  และยังมีหน้าที่รักษาแรงดันให้คงที่ ตกคร่อม  $R_E$  ในขณะที่ตัวต้านทาน  $R_E$  ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานฟีดแบค



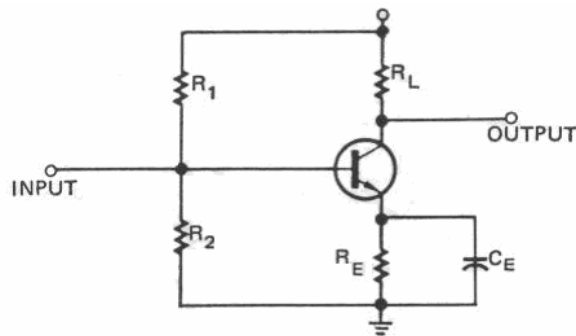
รูปที่ 8.11 อิมิตเตอร์ ฟีดแบค พร้อมกับบายพาส คาปาซิเตอร์

วงจรฟีดแบคแบบแบ่งแรงดัน ดังแสดงในรูป 8.12 เป็นวงจรที่มีความเสถียรมากเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ตัวต้านทาน  $R_B$  จะถูกแทนที่ด้วยตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ตัวต้านทานทั้ง 2 ตัวนี้จะต่อในลักษณะอนุกรมคร่อมแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{CC}$  ตัวต้านทานทั้งสองจะทำการแบ่งแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันออกเป็นสองส่วน

ตัวต้านทาน  $R_2$  จะมีแรงดันตกคร่อมน้อยกว่า  $R_1$  โดยที่แรงดันที่เบสเทียบกับกราวด์จะเท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  จุดประสงค์ของการแบ่งแรงดันก็เพื่อให้แรงดันที่ตกคร่อมเบสกับกราวด์มีค่าคงที่ ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_2$  ไปยังกราวด์จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $R_2$  มีสัถย์ที่เบสเป็นบวกเทียบกับกราวด์

เนื่องจากกระแสอิมิตเตอร์ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_E$  จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  ขึ้น โดยมีสัถย์บวกอยู่ที่ขาอิมิตเตอร์ แรงดันที่ตกคร่อมจังก์ชันเบส-อิมิตเตอร์ จะเกิดขึ้นจากความต่างสัถย์ ระหว่างแรงดันบวกสองแรงดันคือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  และแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_E$  สำหรับแรงดันฟอเวิร์ด ไบอัส ที่เหมาะสมจะปรากฏขึ้นเมื่อแรงดันบวกที่เบสมากกว่าแรงดันบวกที่อิมิตเตอร์

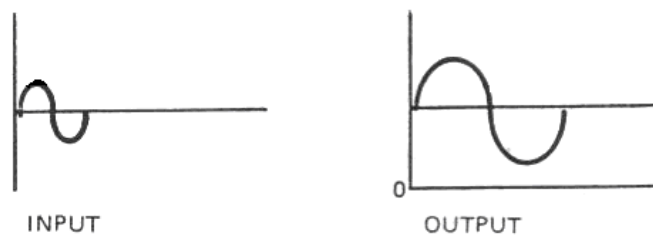
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์และกระแสอิมิตเตอร์ไหลเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสอิมิตเตอร์ไหลเพิ่มขึ้น จะเป็นเหตุให้แรงดันตกคร่อม  $R_E$  เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ที่ขาอิมิตเตอร์มีสัถย์เป็นบวกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกราวด์ และแรงดันฟอเวิร์ด ไบอัสตกคร่อมจังก์ชันเบสอิมิตเตอร์ลดลง จึงทำให้กระแสเบสลดลงด้วย การลดลงของกระแสเบสจะเป็นผลต่อเนื่อง ทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์และกระแสอิมิตเตอร์ลดลงตามไปด้วย และในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิลดลง กระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจะเกิดผลในทางตรงกันข้าม



รูปที่ 8.12 วงจรขยายคอมมอน อิมิตเตอร์ พร้อมกับการฟีดแบคแบบแบ่งแรงดัน

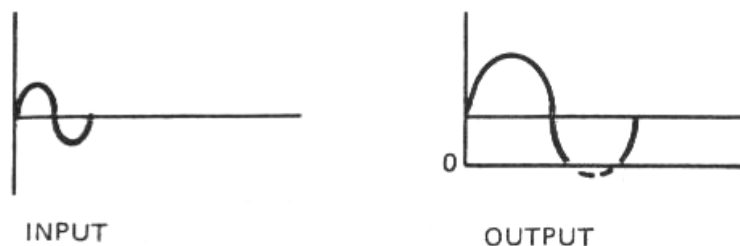
คือจะทำให้กระแสเบสไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์ และกระแสอิมิตเตอร์ไหลเพิ่มขึ้นด้วย

วงจรขยายที่กล่าวมาทั้งหมด ถ้าเราจ่ายสัญญาณอินพุตเป็น เอซีสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมา ก็จะได้เป็นสัญญาณเอซีสด้วย แต่ขนาดของแอมพลิจูดจะเพิ่มสูงกว่าสัญญาณอินพุต ในการขยายซึ่งไบอัสให้กระแสไหลผ่านตลอดทั้งลูกคลื่นการทำงาน เราจะจัดการขยายแบบนี้เป็นคลาสเอ แอมพลิไฟร์ (Class A amplifier) ดังแสดงในรูปที่ 8.13



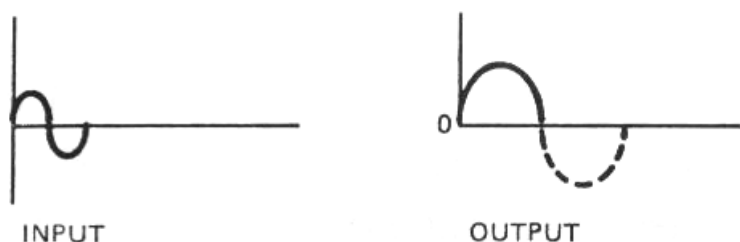
รูปที่ 8.13 แรงดันเอาต์พุตของ คลาส เอ แอมพลิไฟร์  
(class A amplifier)

การขยายซึ่งไบอัสให้กระแสเอาต์พุตไหลน้อยกว่าลูกคลื่นเต็มคลื่น แต่มากกว่าครึ่งคลื่นของลูกคลื่น การทำงานของการขยายนี้จัดเป็นการขยายแบบคลาส เอบี แอมพลิไฟร์ ดังแสดงในรูปที่ 8.14



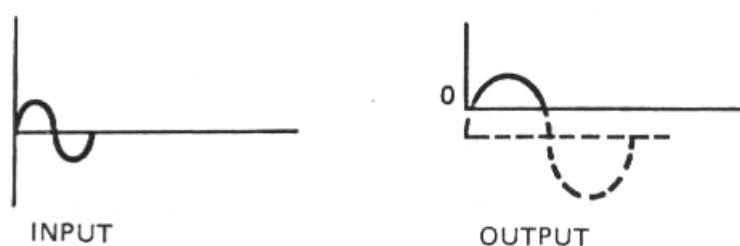
รูปที่ 8.14 แรงดันเอาต์พุตของคลาส เอบี แอมพลิไฟร์  
(class AB amplifier)

การขยายซึ่งไบอัสให้กระแสเอาต์พุตไหลเพียงครึ่งคลื่นของหนึ่งลูกคลื่นสัญญาณอินพุต การทำงานของการขยายนี้ จัดเป็นการขยายแบบคลาส บี แอมพลิไฟร์ ดังแสดงในรูปที่ 8.15



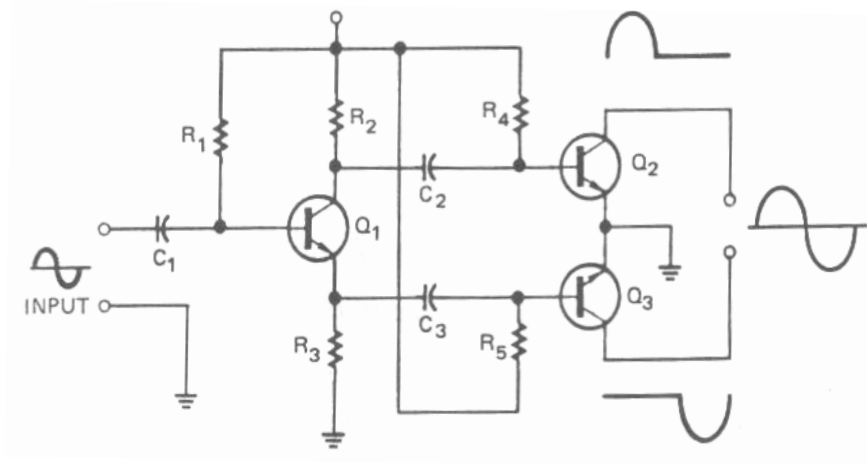
รูปที่ 8.15 แรงดันเอาต์พุตของคลาส บี แอมพลิไฟร์  
(class B amplifier)

การขยายซึ่งไบอัสให้กระแสเอาต์พุตไหลน้อยกว่าครึ่งคลื่นของสัญญาณอินพุต การทำงานของการขยายนี้จัดเป็นการขยายแบบคลาส ซี แอมพลิไฟร์ ดังแสดงในรูปที่ 8.16



รูปที่ 8.16 แรงดันเอาต์พุตของคลาส ซี แอมพลิไฟร์  
(class C amplifier)

การขยายแบบคลาสเอ จะเป็นรูปแบบซึ่งให้ความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด เพราะมีการบิดเบี้ยว น้อยที่สุด จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในงานซึ่งต้องการสัญญาณเต็มคลื่น เช่น ใช้ในการขยาย สัญญาณเสียงวิทยุ และโทรทัศน์ อย่างไรก็ตามการขยายแบบคลาส เอ ต้องใช้กำลังสูงจึงทำให้ ทรานซิสเตอร์ต้องทนกำลังสูงด้วย ดังนั้นเราจึงหันไปใช้การขยายแบบคลาส เอบี หรือ บี



รูปที่ 8.17 การต่อวงจรแบบพุช-พูล

การขยายแบบคลาส เอบี บี และซี จะมีการผลิตความเพี้ยนของสัญญาณบ้างเล็กน้อยทั้งนี้ เพราะการขยายเหล่านี้ได้ทำการขยายเพียงบางส่วนของสัญญาณอินพุต เพื่อให้ได้สัญญาณเอซีเต็ม ลูกคลื่น จึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวต่อแบบพุชพูล (PUSH PULL) ดังแสดงในรูปที่ 8.17

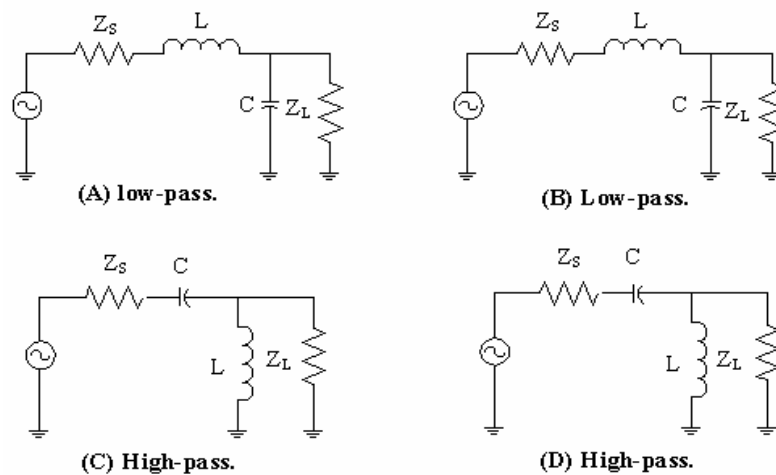
ในการขยายคลาส บี ส่วนมากจะนำไปใช้เพื่อขยายสัญญาณในจรของระบบสเตอริโอ และ ใช้ในวงจรขยายสัญญาณทั่วไป ในงานควบคุมทางด้านอุตสาหกรรม ส่วนมากการขยายแบบคลาส ซี จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการกำลังขยายสูง และงานส่งสัญญาณที่เป็นการขยายความถี่เดียว เช่น คลื่นพาหะของคลื่นวิทยุสำหรับการส่งสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์

## บทที่ 9

### การแมทซ์อิมพีแดนซ์

การแมทซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance matching) มีความจำเป็นในการออกแบบวงจรอาร์เอฟ (RF circuit) เป็นอย่างมาก เพื่อที่จะได้มาซึ่งการถ่ายโอนพลังงานสูงสุด ระหว่างแหล่งกำเนิดพลังงาน (source) และโหลด (load)

วงจรการแมทซ์ที่เป็นไปได้ง่ายที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือ โครจข่ายชนิดแอล ดังแสดงในรูป 9.1 ซึ่งวงจรในรูป ได้ชื่อเช่นนี้เพราะองค์ประกอบวางตัวที่มีลักษณะเหมือนรูปร่างของตัวแอล (L)



รูป 9.1 โครจข่ายชนิด L

ในการออกแบบโครจข่ายของการแมทซ์อิมพีแดนซ์ ของรูป 9.1 สามารถออกแบบได้อย่างง่ายดายโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$Q_s = Q_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_s} - 1} \quad (\text{สมการ 9-1})$$

$$Q_s = X_s/R_s \quad (\text{สมการ 9-2})$$

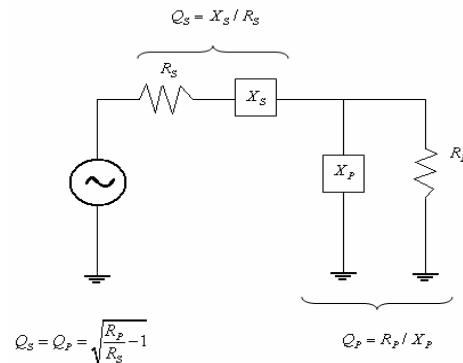
$$Q_p = X_p/R_p \quad (\text{สมการ 9-3})$$

ดังแสดงในรูป 9.2

- เมื่อ
- $Q_s$  = ค่า Q ของขาที่ต่ออนุกรม (series leg)
  - $Q_p$  = ค่า Q ของขาที่ต่อขนาน (shunt leg)
  - $R_p$  = ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม (shunt resistance)
  - $X_p$  = ค่ารีแอคแตนซ์ที่ต่ออนุกรม (shunt reactance)
  - $R_s$  = ค่าความต้านทานที่ต่อขนาน (series resistance)
  - $X_s$  = ค่ารีแอคแตนซ์ที่ต่อขนาน (series reactance)



ขนาดของ  $X_p$  และ  $X_s$  บางครั้ง จะเป็นความต้านขดลวดตัวเก็บประจุ หรือความต้านทานขดลวดตัวเหนี่ยวนำ ทั้งคู่ แต่ละตัวบางทีจะมีชนิดตรงข้ามกัน ถ้า  $X_p$  เลือกเป็น ตัวเก็บประจุ สำหรับ  $X_s$  ต้องเป็นตัวเหนี่ยวนำ ในทางตรงกันข้ามก็เช่นเดียวกัน ดังในตัวอย่าง 1 แสดงให้เห็นถึงการกำหนดดังกล่าว



รูป 9.2 สรุปการออกแบบโดยใช้เนตเวิร์คชนิดแอล

ในตัวอย่าง 1 ถูกใช้สำหรับกรณีง่าย ๆ ของการ แมทซ์อิมพีแดนซ์ 2 ค่าจริง (ความต้านทานแท้)

**ตัวอย่างที่ 1** ออกแบบวงจรเพื่อทำการ แมทซ์ ระหว่างแหล่งกำเนิด 100 โอห์มกับโหลด 1000 โอห์ม ที่ความถี่ 100 MHz. โดยยอมให้แรงดันกระแสตรง ผ่านจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด

#### วิธีทำ

ต้องการเส้นทาง DC ระหว่างแหล่งกำเนิดและโหลด ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรม ดังแสดงในรูป 9.1 จากสมการที่ 9-1 จะได้

$$\begin{aligned}
 Q_s = Q_p &= \sqrt{\frac{1000}{100} - 1} \\
 &= \sqrt{9} \\
 &= 3
 \end{aligned}$$

จากสมการ 9-2 จะได้

$$\begin{aligned}
 X_s &= Q_s R_s \\
 &= (3)(100) \\
 &= 300 \text{ โอห์ม (ค่าความเหนี่ยวนำ)}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น จากสมการ 9-3:

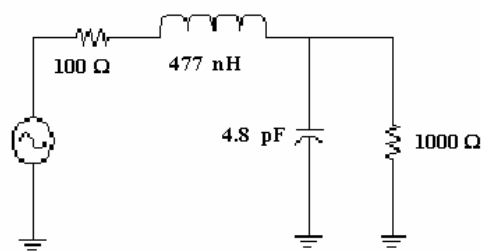
$$\begin{aligned}
 X_p &= \frac{R_p}{Q_p} \\
 &= \frac{1000}{3} \\
 &= 333 \text{ โอห์ม (ค่าความต้านทาน)}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าองค์ประกอบที่ความถี่ 100 MHz. คือ

$$L = \frac{X_s}{\omega}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{300}{2\pi(100 \times 10^6)} \\
 &= 477 \text{ nH} \\
 C &= \frac{1}{\omega X_p} \\
 &= \frac{1}{2\pi(100 \times 10^6)(333)} = 4.8 \text{ pF}
 \end{aligned}$$

ดังแสดงผลวงจรในรูป 9.3

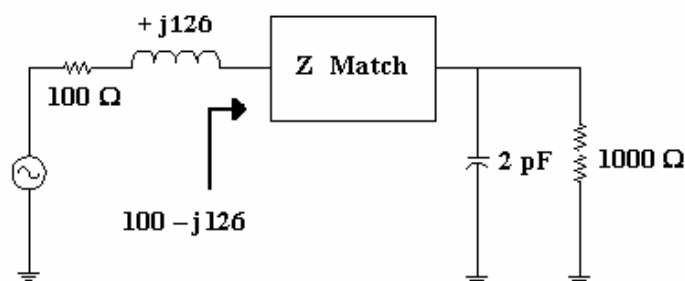


รูป 9.3 วงจรสุดท้ายที่ได้

สำหรับการออกแบบอาจจะใช้ประโยชน์ได้น้อย ให้พิจารณาตัวอย่างที่ง่าย 2 ตัวอย่างนี้ เพื่อที่จะช่วยให้เกิดความเข้าใจชัดเจนมากยิ่งขึ้น

#### ตัวอย่าง 2

ในการแมทช์ แหล่งกำเนิดและโหลด ดังแสดงในรูป 9.4 (ที่ความถี่ 100 MHz.)

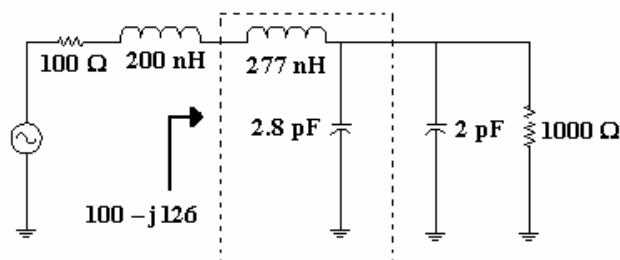


รูป 9.4 วงจรของแหล่งกำเนิดเชิงซ้อนและโหลดสำหรับตัวอย่าง 2

#### วิธีทำ

ขั้นตอนแรกในกระบวนการออกแบบ คือไม่ต้องสนใจ รีแอกแตนซ์ ใด ๆ ทั้งหมดและมองว่าเป็นการแมทช์ เฉพาะส่วนจริง 100 โอห์มของแหล่งกำเนิดกับส่วนจริง 1000 โอห์ม ของโหลดที่ความถี่ 100 MHz. เก็บไว้ในใจว่าจะต้องวางตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับ ความเหนี่ยวนำ ที่ติดมาด้วย และวางตัวเก็บประจุขนานกับ ความเก็บประจุ ที่ติดมาด้วย เพื่อความสะดวกให้ดูตามรูป 9.1A อีกครั้งเลือกการออกแบบและในตัวอย่าง 1 จะให้รายละเอียดในการทำ ดังนั้นในการคำนวณค่าต่างๆ ในโครงข่าย ถ้าเราไม่สนใจค่า รีแอกแตนซ์ ที่ติดมาด้วยจะ สามารถแสดงได้วงจรในรูป 9.3 แต่ค่า รีแอกแตนซ์ ที่ติดมาด้วยยังไม่หายไป การออกแบบยังไม่สิ้นสุด เราใช้วิธีการใดวิธีหนึ่งกับค่า รีแอก

แทนซ์ ที่ติดมาด้วยในโครงข่าย ซึ่งจะได้ว่าตอนที่โหลดต้องการ ค่า ความเก็บประจุ ขนาด 4.8 pF สำหรับการ แมทช์ แต่เรามีติดมาอยู่แล้ว 2 pF ถ้าเราใช้ตัวเก็บประจุขนาด 2.8 pF ต่อขนานเข้าไป ก็จะได้ 4.8 pF ในทำนองเดียวกันทางด้านแหล่งกำเนิดออกแบบมาได้ตัวเหนี่ยวนำอนุกรม 477 nH เรามีอยู่แล้ว +j126 โอห์ม หรือ 200 nH ดังนั้นตอนนี้เราต้องการ ความเหนี่ยวนำ อีก  $477 \text{ nH} - 200 \text{ nH} = 277 \text{ nH}$  แล้วเราก็จะได้ค่าความเหนี่ยวนำแบบอนุกรมรวมทั้งหมดเท่ากับ 477 nH ตามที่ได้คำนวณ จะได้วงจรสุดท้ายดังแสดงในรูป 9.5



รูป 9.5 วงจรสุดท้ายในการออกแบบสำหรับ ตัวอย่าง 2

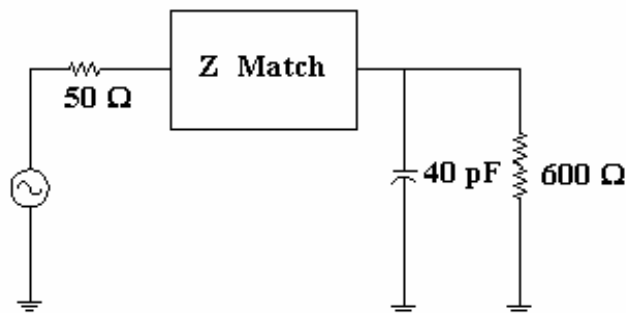
ข้อสังเกตในตัวอย่าง 2 ไม่ได้กล่าวถึงการทำการแมทช์คอนจูเกต ค่าอิมพีแดนซ์ในการแมทช์ จะถูกมองมาจากทางแหล่งกำเนิดได้เป็น  $100 - j126$  โอห์ม และค่าคอนจูเกตเชิงซ้อน เป็น  $100 + j126$  โอห์ม

จะเห็นได้ว่าถ้าองค์ประกอบที่ติดมามีขนาดใหญ่กว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ การเชื่อมต่อ จะไม่สามารถจัดวางได้ ในตัวอย่างถ้าให้ค่าความเก็บประจุ ที่ติดมาในรูป 9.4 มีค่าเท่ากับ 20 pF เราไม่สามารถที่จะนำค่าตัวเก็บประจุมาต่อขนานเพื่อให้ได้ค่า ความเก็บประจุ เท่ากับ 4.8 pF ตามต้องการได้ ในสถานการณ์เช่นนี้ ไม่สามารถทำได้ หลักการของการสะท้อนจับคู่กับการเชื่อมต่อ มักจะถูกใช้แทนกัน

ตัวอย่าง 2 และ 3 แสดงรายละเอียดก่อนข้างสำคัญเกี่ยวกับหลักการในการออกแบบ โครงข่ายการแมทช์อิมพีแดนซ์ ประกอบด้วย การวางแผนและการเตรียมในการออกแบบอย่างง่าย ระหว่างโหลดเชิงซ้อน ให้กลายเป็น Simple number-crunching โดยใช้หลักการพีชคณิตขั้นพื้นฐาน ค่ารีแอคแตนซ์ที่ติดมาต่าง ๆ ที่อยู่ในแหล่งกำเนิดและโหลด สามารถดูเพิ่มเติมในโครงข่ายการแมทช์ อิมพีแดนซ์ได้ (ตัวอย่างที่ 2) หรือสามารถสะท้อนด้วยค่าเท่ากันและค่า รีแอคแตนซ์ ที่มีค่าตรงข้าม กัน จากนั้นก็จะดูเข้าไปในโครงข่ายการแมทช์อิมพีแดนซ์ (ตัวอย่าง 3)

### ตัวอย่าง3

ออกแบบโครงข่ายการแมทช์อิมพีแดนซ์ เพื่อทำการป้องกันการไหลของ DC จากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดดังรูป 9.6 ความถี่ใช้งานเท่ากับ 75 MHz. พยายามให้เกิดการพ้องกัน (resonant)

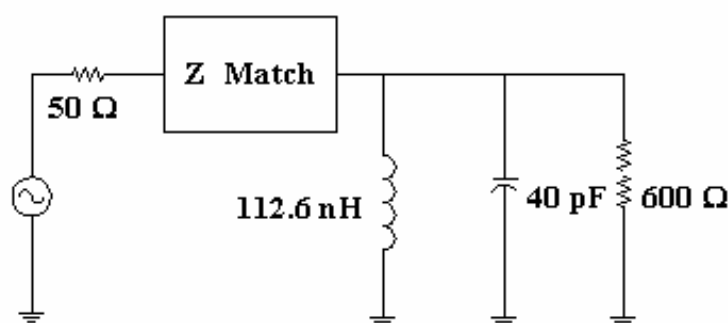


รูป 9.6 วงจรโหลดเชิงซ้อน สำหรับตัวอย่าง3

### วิธีทำ

ต้องการป้องกันการไหลของ DC จากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดสามารถควบคุมได้โดยใช้ วงจร แมทช์ ในรูป 9.1C แต่สิ่งแรกให้กำจัดค่า ความเก็บประจุ 40 pF ที่ติดมาด้วยโดย resonating ด้วยตัวเหนี่ยวนำแบบขนานที่ความถี่ 75 MHz.

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{\omega^2 C_{\text{stray}}} \\
 &= \frac{1}{\left[2\pi(75 \times 10^6)\right]^2 (40 \times 10^{-12})} \\
 &= 112.6 \text{ nH}
 \end{aligned}$$



รูป 9.7 การพ้องของโหลดที่มีความเก็บประจุเกินมา

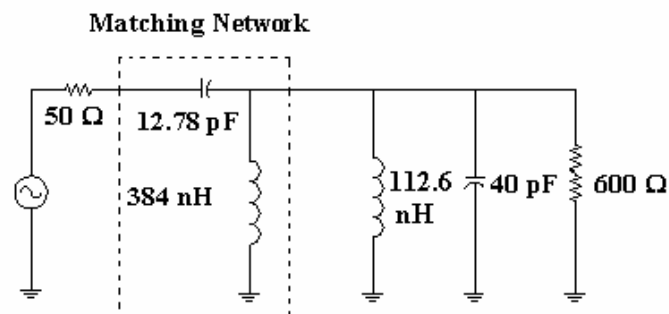
ดังเหลือแสดงวงจรไว้ในรูป 9.7 ขณะนี้เราได้ทำการกำจัด ความเก็บประจุ ที่ติดมาด้วยเรียบร้อยแล้ว เราสามารถทำการ แมทช์ ระหว่างแหล่งกำเนิด 50 โอห์มกับโหลด 600 โอห์ม ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Q_s = Q_p &= \sqrt{\frac{R_s}{R_p} - 1} \\
 &= \sqrt{\frac{600}{50} - 1} \\
 &= 3.32 \\
 X_s &= Q_s R_s \\
 &= (3.32)(50) \\
 &= 166 \text{ ohms}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_p &= \frac{R_s}{Q_p} \\
 &= \frac{600}{3.32} \\
 &= 181 \text{ ohms}
 \end{aligned}$$

ด้วยเหตุนี้จึงได้ว่าแต่ละองค์ประกอบมีค่าเป็น:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1}{\omega X_s} \\
 &= \frac{1}{2\pi(75 \times 10^6)(166)} \\
 &= 12.78 \text{ pF} \\
 L &= \frac{X_p}{\omega} \\
 &= \frac{181}{2\pi(75 \times 10^6)} \\
 &= 384 \text{ nH}
 \end{aligned}$$

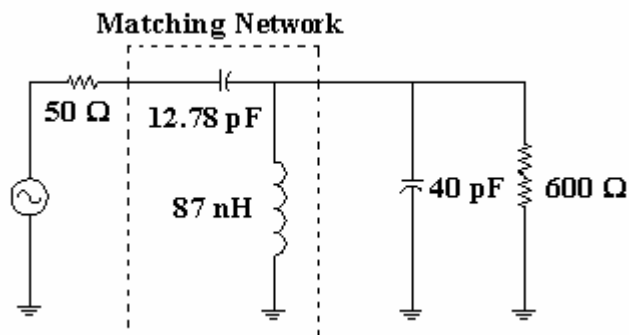


รูป 9.8 วงจรรูป 9.6 หลังการทำการแมทช์อิมพีแดนซ์

ค่าเหล่านี้ได้แสดงผลวงจรในรูป 9.8 แต่สังเกตว่าวงจรสามารถจัดรูปให้ง่ายขึ้นโดยการรวมตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัวที่ขนานกันอยู่ให้เป็นตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว ดังนั้น

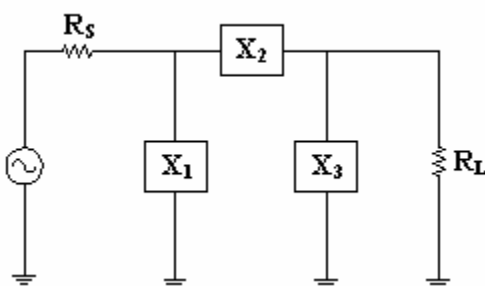
$$\begin{aligned}
 L_{new} &= \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \\
 &= \frac{(384)(112.6)}{384 + 112.6} \\
 &= 87 \text{ nH}
 \end{aligned}$$

รูปวงจรที่ได้จากการออกแบบปรากฏอยู่ในรูป 9.8

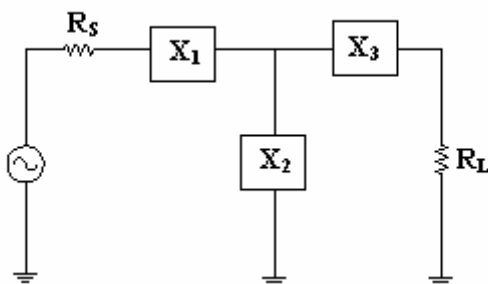


รูป 9.9 วงจรสุดท้ายสำหรับตัวอย่าง 3

นอกจากนี้ยังมีโครงข่ายแบบ 3 องค์ประกอบ (ในรูป 9.10) เรียกว่าโครงข่ายแบบไพล เพราะว่ามันคล้ายกับตัว  $\pi$  ซึ่งเป็นตัวอักษรของกรีก โครงข่ายพวกเดียวกัน (ในรูป 9.11) เรียกว่าโครงข่ายแบบที (T) ด้วยเหตุผลแบบเดียวกัน



รูป 9.10 โครงข่าย 3 องค์ประกอบแบบไพล

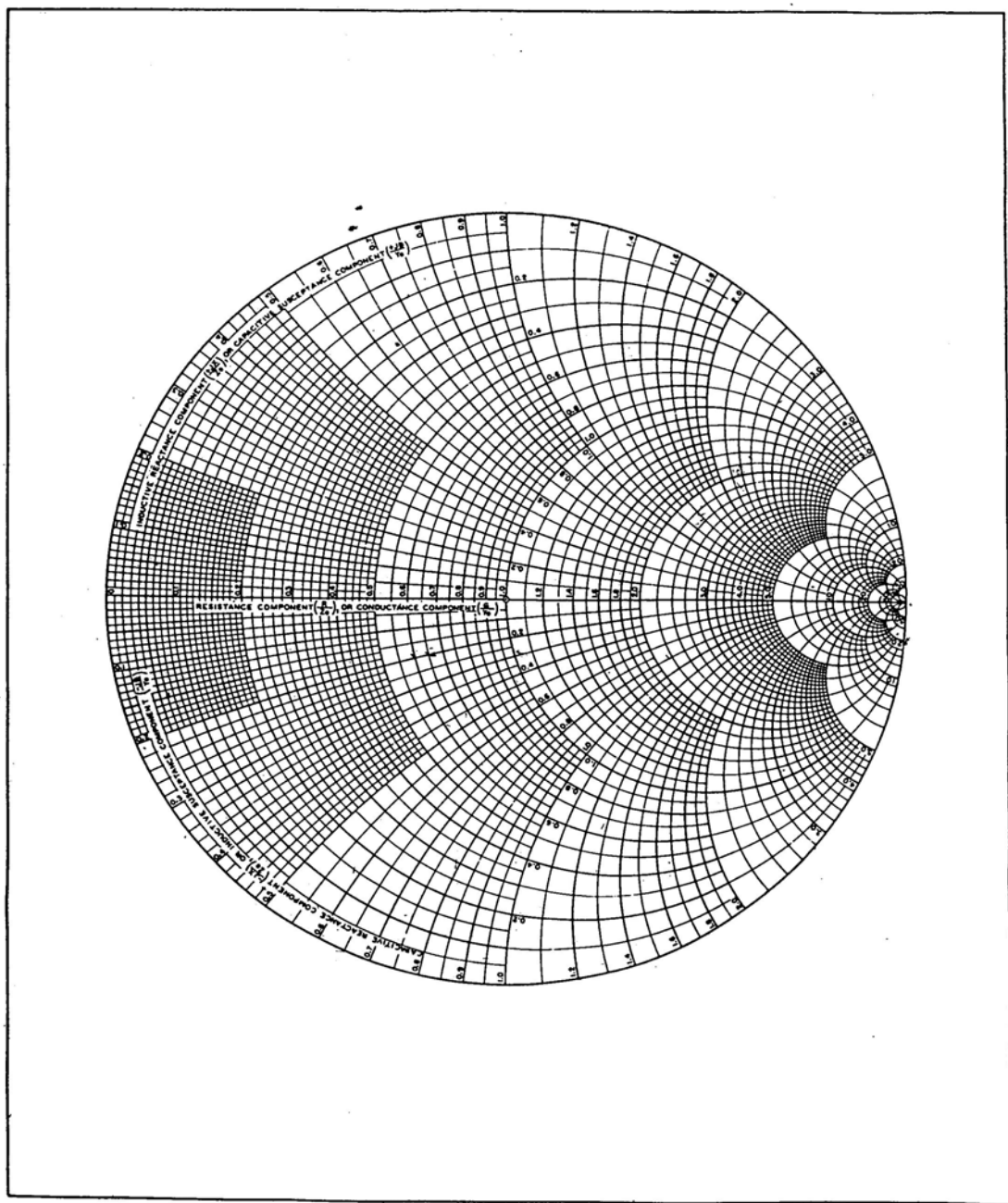


รูป 9.11 โครงข่าย 3 องค์ประกอบแบบที

### การพล็อตค่าอิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิท

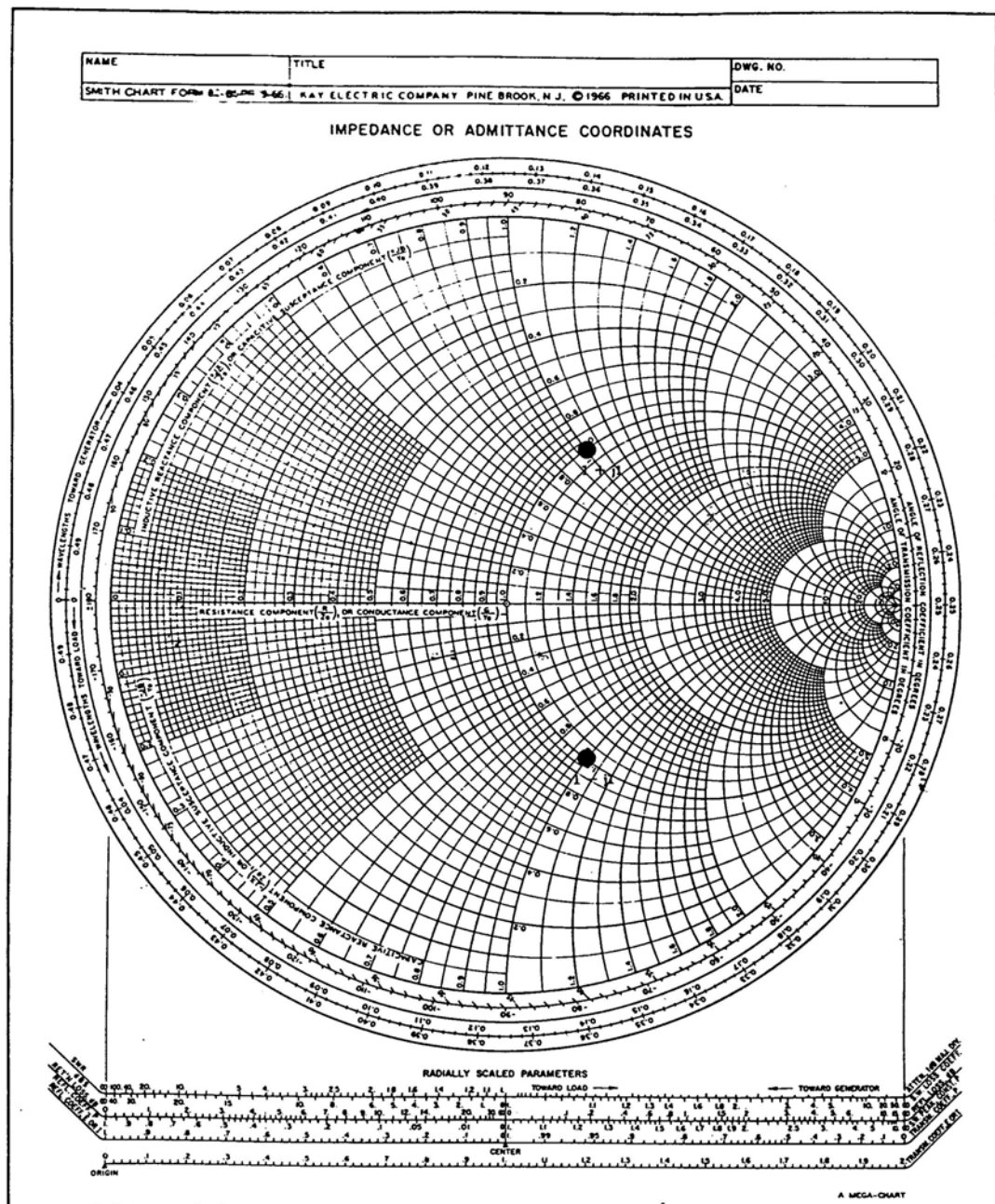
แต่ละจุดบน แผนภูมิสมิท (Smith chart) จะแสดงการต่อแบบอนุกรมของ ความต้านทาน และ รีแอกแตนซ์ จาก  $Z=R+jX$  เช่น อิมพีแดนซ์ ที่  $Z=1+j1$  นั้นแสดงว่า  $R=1$  เป็นค่าคงที่ ความต้านทาน บนวงกลมและ  $X=1$  เป็นค่าคงที่ รีแอกแตนซ์ บนวงกลม พล็อตเป็นจุดตามวงกลมในรูป 9.13 โดยการสร้างจุดให้อยู่ในซีกข้างบน นั้นแสดงว่าค่าของ  $X$  เป็นบวก ซึ่งเป็นค่าของ รีแอกแตนซ์ และ ตัวเหนี่ยวนำ ในทางตรงข้ามกันถ้าทำการพล็อตจุดที่ซีกล่างจะแสดงว่าค่าของ  $X$  เป็นลบ ซึ่งเป็นค่าของ ตัวเก็บประจุ

โดยทั่วไปถ้าค่าของ  $R=1$  จะเป็นค่าคงที่ของ ความต้านทาน บนวงกลม และ  $X=-1$  เป็นค่าคงที่ของ รีแอกแตนซ์ ซึ่งจะดูจากการพล็อตจุดบน แผนภูมิสมิท ในเริ่มแรกจะทำการหาจุดต่างๆ ที่ต่อแบบอนุกรมจาก  $Z=R+jX$  บน แผนภูมิสมิท ซึ่ง  $R$  คือค่าคงที่ และ  $X$  คือค่าคงที่ของวงกลม ค่าของ อิมพีแดนซ์ ที่ใช้พล็อตบน แผนภูมิสมิทนั้นจะต้องเป็นค่าเล็กๆ เช่นถ้าเราพยายามจะพล็อตค่าของ อิมพีแดนซ์ ที่  $Z=100+j150$  เราจะไม่สามารถทำการพล็อตได้เพราะว่าที่  $R=100$  และ  $X=150$  นั้นซึ่งบนวงกลมจะไม่สามารถพล็อตได้เนื่องจากค่าที่ได้นั้นเป็นค่าที่ใหญ่มาก เราจะต้องทำการ normalization เพื่อให้แต่ละ อิมพีแดนซ์ ที่ทำการพล็อตนั้นเป็นค่าใหม่ โดย อิมพีแดนซ์ ค่าใหม่ที่ได้ นั้นจะเป็นค่าของการ นอร์มอลไลซ์ ที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางที่สร้างขึ้นใหม่ จากตัวอย่างที่ผ่านมาคือ  $Z=100+j150$  โดยเรากำหนดให้  $Z_0=100$  แล้วค่าที่ได้เป็นค่าใหม่คือ  $Z=1+j1.5$  ทำการ นอร์มอลไลซ์ ได้ง่ายมากโดยนำค่าของ  $Z_0$  มาหารค่าของ อิมพีแดนซ์ทั้งหมดก็จะได้ค่าของ  $Z$  ที่ นอร์มอลไลซ์แล้วที่สามารถนำไปพล็อตบน แผนภูมิสมิทได้

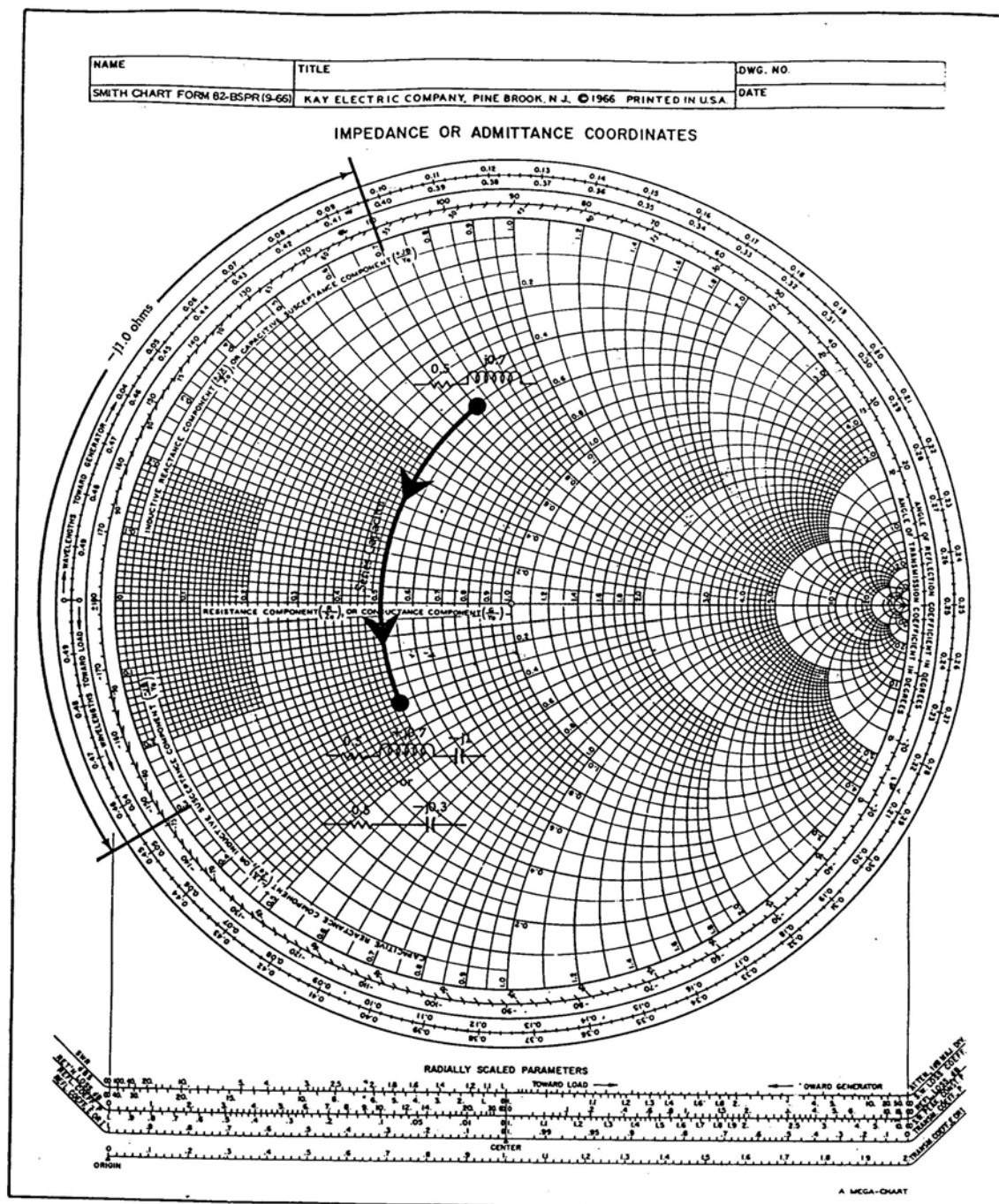


รูป 9.12 แผนภูมิสมิทพื้นฐาน

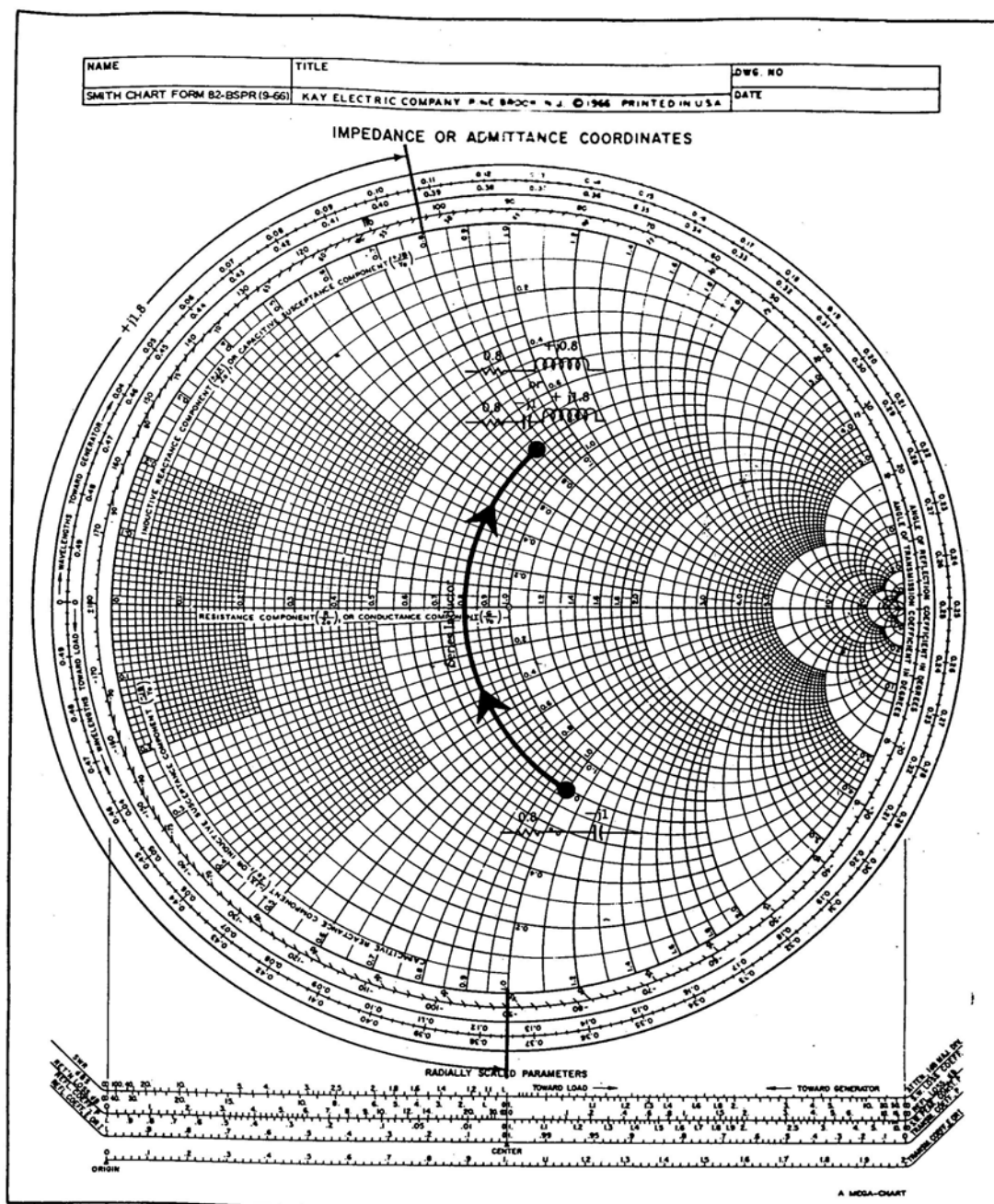




รูป 9.13 การพล็อตอิมพีแดนซ์บนสมิทชาร์ท



รูป 9.14 การเพิ่มตัวเก็บประจุแบบอนุกรมบนสมิทชาร์ท



รูป 9.15 การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมบนสมิทชาร์ท

### การพล็อตอิมพีแดนซ์อย่างง่ายบนแผนภูมิสมิท

จากรูป 9.14 จะเห็นว่าค่าที่ทำการพล็อตบนแผนภูมิสมิทนั้นเป็นค่าที่ได้จากการอนุกรมของตัวเก็บประจุ ที่  $-j1.0$  โอห์ม ที่เพิ่มใน อิมพีแดนซ์ ที่  $Z=0.5+j0.7$  โอห์ม ผลที่ได้คือ

$$\begin{aligned} Z &= 0.5 + j0.7 - j0.1 \\ &= 0.5 - j0.3 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าค่าที่ได้เป็นการต่อแบบอนุกรม RC ส่วนการหมุนทวนเข็มนาฬิกา  $R=0.5$  โอห์ม ซึ่งเป็นค่าคงที่ของ ความต้านทาน บน แผนภูมิสมิท ที่มีระยะทางที่  $X=-j1.0$  โอห์ม ทำการพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ ที่จุด  $Z=0.5-j0.3$  โอห์ม ซึ่งแสดงในรูป 9.15 ที่เพิ่มค่าความเหนี่ยวนำแบบอนุกรม เมื่อพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ แล้วทำการหมุนตามเข็มนาฬิกาจะทำให้ได้ค่าของอิมพีแดนซ์ใหม่ที่เป็นค่าคงที่ของความต้านทาน

โครงสร้างสำคัญที่จะทำการออกแบบให้การแมทช์อิมพีแดนซ์ใน โครงข่ายนั้นคือ แผนภูมิสมิท และต้องทำความเข้าใจด้วย ในการทำเริ่มแรกทำการเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุ แบบอนุกรมก่อนแล้วหมุน อิมพีแดนซ์แบบทวนเข็มนาฬิกาทำให้ได้ค่าคงที่ความต้านทานที่มีระยะทางที่เท่ากันกับค่าของรีแอคแตนซ์และ ตัวเก็บประจุ และเมื่อทำการเพิ่มค่าของตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมแล้วนำไปพล็อตบน แผนภูมิสมิท แล้วทำการหมุน อิมพีแดนซ์ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ทำให้ได้ค่าคงที่ความต้านทานที่มีระยะทางที่เท่ากันกับค่าของรีแอคแตนซ์และ ตัวเก็บประจุ

### การแปลงค่าอิมพีแดนซ์ไปสู่แอดมิทแตนซ์

แผนภูมิสมิท มีความสัมพันธ์กันกับค่าของอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) และ แอดมิทแตนซ์( $Y$ ) ในการคำนวณค่าของ แอดมิทแตนซ์จะแปรผกผันกับค่า อิมพีแดนซ์ ทำให้ได้สมการคือ

$$Y = 1/Z \quad (\text{สมการ 9-4})$$

สำหรับค่า แอดมิทแตนซ์( $Y$ ) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพซึ่งเหมือนกับค่า อิมพีแดนซ์ คือ

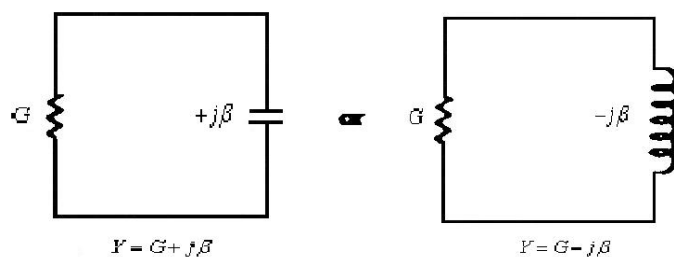
$$Y = G \pm jB \quad (\text{สมการ 9-5})$$

สำหรับวงจรที่นำมาแสดงในรูป 9.16 เป็นแบบ ชัสเซ็ปแดนซ์ (Susceptance) ก็เป็นตัวเก็บประจุแบบบวก และเป็นตัวเหนี่ยวนำแบบลบ ซึ่งค่า รีแอคแตนซ์ ที่ได้มีค่าตรงกันข้ามกันจริง

ในการหาค่าของส่วนกลับของค่า อิมพีแดนซ์แบบอนุกรมจาก  $Z=R+jX$  ในทางคำนวณโดยใช้สมการที่ 9-4 แต่เราต้องคิดว่าจะใช้ แผนภูมิสมิทอย่างไรให้มีค่าตามที่เราคำนวณ มันสามารถทำได้ง่ายมากโดยใช้การคำนวณจาก โจทย์และทำการพล็อตผลที่ได้แล้วสังเกตว่าค่าที่ได้มีสองอย่างหรือไม่ เช่น ถ้าทำการต่อ อิมพีแดนซ์ แบบอนุกรมที่  $Z=1+j1$  แล้วทำการแปรเป็นส่วนกลับคือ

$$\begin{aligned}
 Y &= 1/(1+j1) \\
 &= 1/(1.414/45^\circ) \\
 &= 0.7071/45^\circ \\
 &= 0.5-j0.5
 \end{aligned}$$

ถ้าทำการพล็อตที่จุด  $1+j1$  และ  $0.5-j0.5$  บน แผนภูมิสมิท จะเห็นว่ามันทำได้ง่ายมากในการพล็อตระหว่างสองจุดจากรูป 9.17 โดยที่จุดสองจุดอยู่ตรงกันข้ามกัน  $(180^\circ)$  จะต้องมีระยะทางเท่ากันถ้าวัดจากจุดศูนย์กลาง ซึ่งค่าที่พล็อตจุดแรกนั้นเป็น อิมพีแดนซ์ และอีกจุดก็จะมีค่าตรงข้ามกัน เราสามารถหาการกระจายของค่า อิมพีแดนซ์ และ แอดมิตแตนซ์โดยการพล็อตบน แผนภูมิสมิท ที่มีระยะทางจากจุดศูนย์กลางเท่ากัน



รูป 9.16 วงจรแทนค่าแอดมิตแตนซ์

ในการสร้างจุดที่  $180^\circ$  จากจุดเริ่มต้นผลที่ได้คือเราสามารถอ่านทิศทางการหมุนของแผนภูมิสมิท ซึ่งแสดงในรูป 9.18 ทิศที่แสดงการหมุนคือเส้นสีดำที่ทำการพล็อตอิมพีแดนซ์ ที่ค่า  $Z=1+j1$  โอห์มและแสดงจุดสีดำที่แกนของ  $Y=0.5-j0.5$  จากรูป 9.18 เราสามารถทำการหมุนได้  $180^\circ$  ซึ่งแสดงค่าแอดมิตแตนซ์โดยที่ชี้ข้างบนเป็น แอดมิตแตนซ์แบบซัสเซ็ปแตนซ์ค่าลบ (negative susceptance,  $-jB$ ) หรือคือ ความเหนี่ยวนำ ขณะที่ชี้ข้างล่างเป็น แอดมิตแตนซ์แบบ ซัสเซ็ปแตนซ์ค่าบวก (positive susceptance,  $+jB$ ) หรือคือ ความเก็บประจุ จากรูป 9.18 จะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ และ แอดมิตแตนซ์โดยใช้แผนภูมิสมิทแผ่นเดียวได้

### การพล็อตแอดมิตแตนซ์อย่างง่ายบนแผนภูมิสมิท

จากการพล็อตจุดของ อิมพีแดนซ์ จากรูป 9.14 และ 9.15 เราสามารถใช้การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่เพิ่มเข้ามาใน อิมพีแดนซ์ และค่า แอดมิตแตนซ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นแบบขนานที่ทำการเพิ่ม แอดมิตแตนซ์ส่วนรูป 9.19 เป็นการเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุแบบขนาน โดยเริ่มจากค่าแอดมิตแตนซ์ที่  $Y=0.2-j0.5$  โอห์มและเพิ่มตัวเก็บประจุแบบขนานกับค่า ซัสเซ็ปแตนซ์ ที่  $+j0.8$  โอห์ม ซึ่งเราจะรู้ผลจากการเพิ่ม ซัสเซ็ปแตนซ์ แบบขนานคือ

$$Y=0.2-j0.5+j0.8$$

$$=0.2+j0.3$$

ถ้าจุดที่พล็อตเป็น แอดมิตแตนซ์ เราจะสามารถรู้ค่าของค่าคงที่ conductance ซึ่งอ่านจากการหมุนจุดแบบตามเข็มนาฬิกาที่ระยะทาง  $jB=0.8$  ซึ่งเป็นส่วนจริง ที่ทำการเพิ่ม ตัวเหนี่ยวนำ แบบขนาน โดยค่าที่ได้ของ แอดมิตแตนซ์ส่วนจินตภาพเป็น conductance ที่อ่านโดยทวนเข็มนาฬิกาที่มีระยะทาง  $(-jB)$  ที่เท่ากับค่า ซัสเซ็ปแตนซ์

### การแมทช์อิมพีแดนซ์ บนแผนภูมิสมิท

สำหรับกรณีการต่อแบบอนุกรมและแบบขนานลงบน แผนภูมิสมิท จะเป็นการทำให้เกิดเป็น การแมทช์อิมพีแดนซ์ โดยการให้ค่าโหลด อิมพีแดนซ์ และค่าของอิมพีแดนซ์ ที่แหล่งกำเนิดมีค่าเท่ากัน โดยการเพิ่มค่าที่เราออกแบบให้เป็นอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมหรือแบบขนานให้อิมพีแดนซ์ทั้งสองฝั่งเกิดการ แมทช์ กัน ดูตัวอย่างที่ 4

### การแมทช์สององค์ประกอบ

การทำแมทช์ของระบบสองระบบคือการคำนวณโดยใช้สูตรสำหรับการหาค่าต่างๆ ค่าที่ได้จากการพล็อตบน แผนภูมิสมิท สามารถนำมาคำนวณเป็นสมการได้โดย

อนุกรม C;  $C=1/\omega XN$  (สมการ 9-6)

อนุกรม L;  $L=XN/\omega$  (สมการ 9-7)

ขนาน C;  $C=B/\omega N$  (สมการ 9-8)

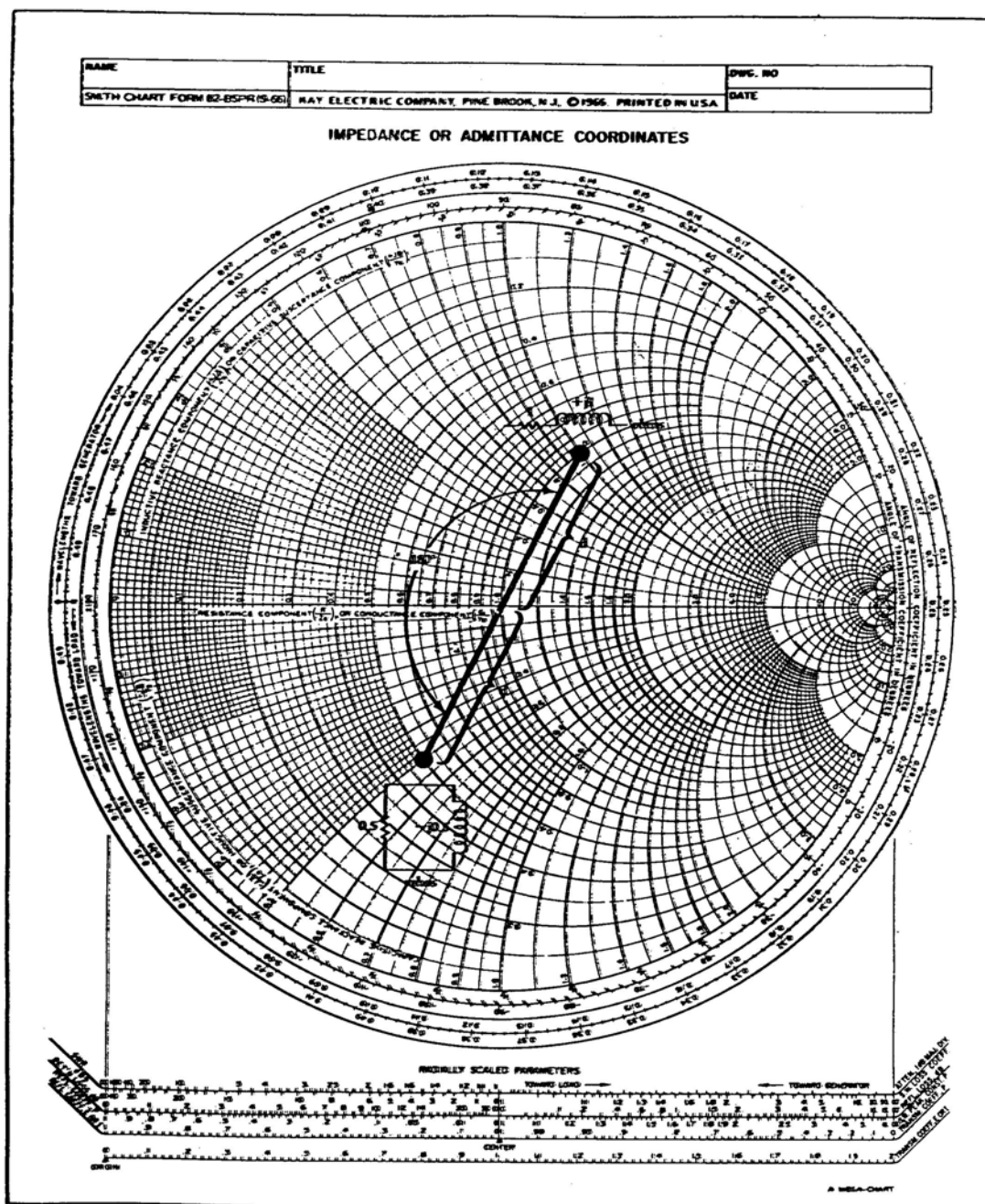
ขนาน L;  $L=N/\omega B$  (สมการ 9-9)

โดยที่  $\omega=2\pi f$

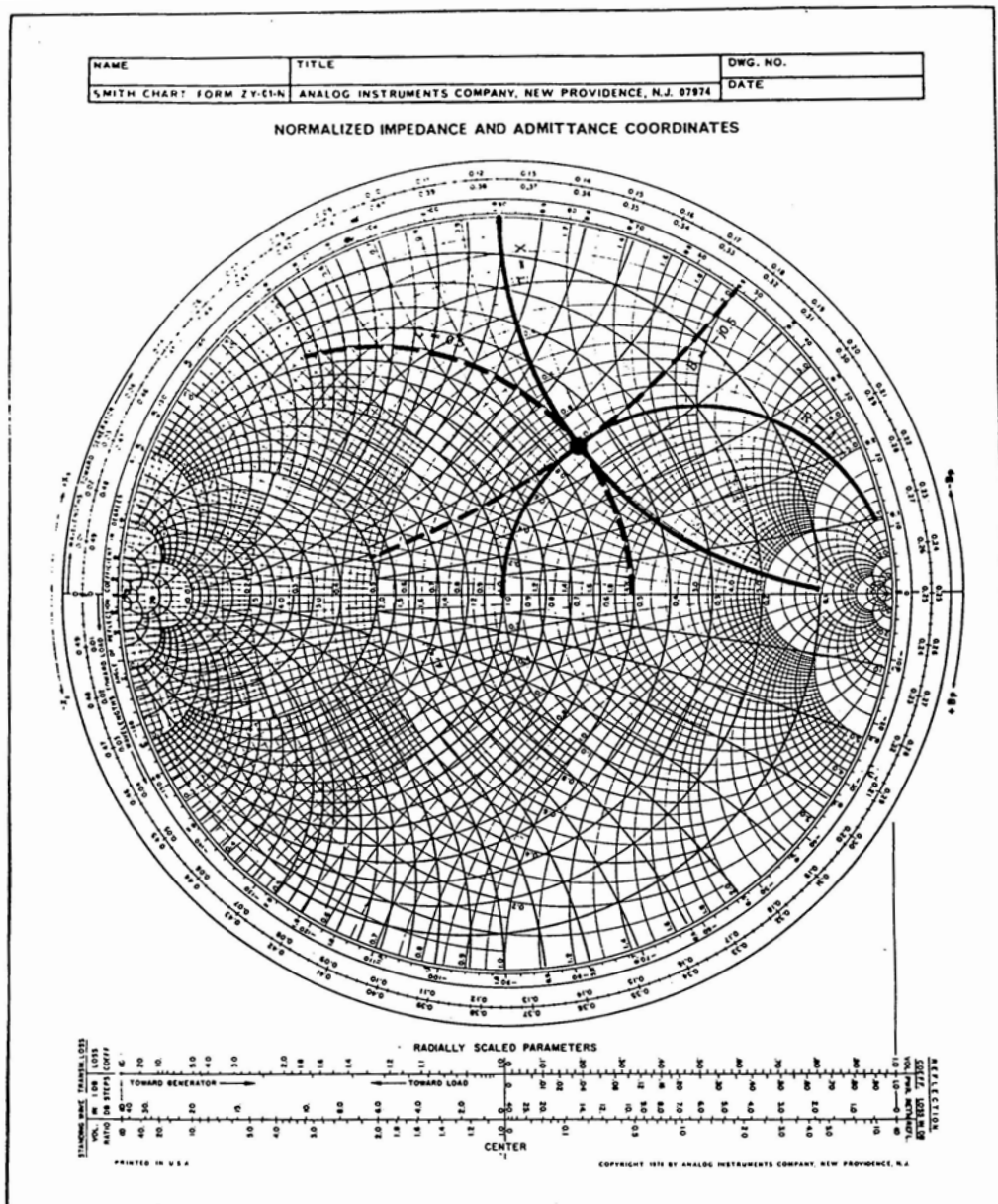
X=ค่า รีแอคแตนซ์ ที่อ่านได้จาก แผนภูมิสมิท

B=ค่า ซัสเซ็ปแตนซ์ ที่อ่านจาก แผนภูมิสมิท

N=จำนวนเต็มที่ใช้สำหรับการนอร์มอลไลซ์ ที่ทำให้การแมทช์อิมพีแดนซ์

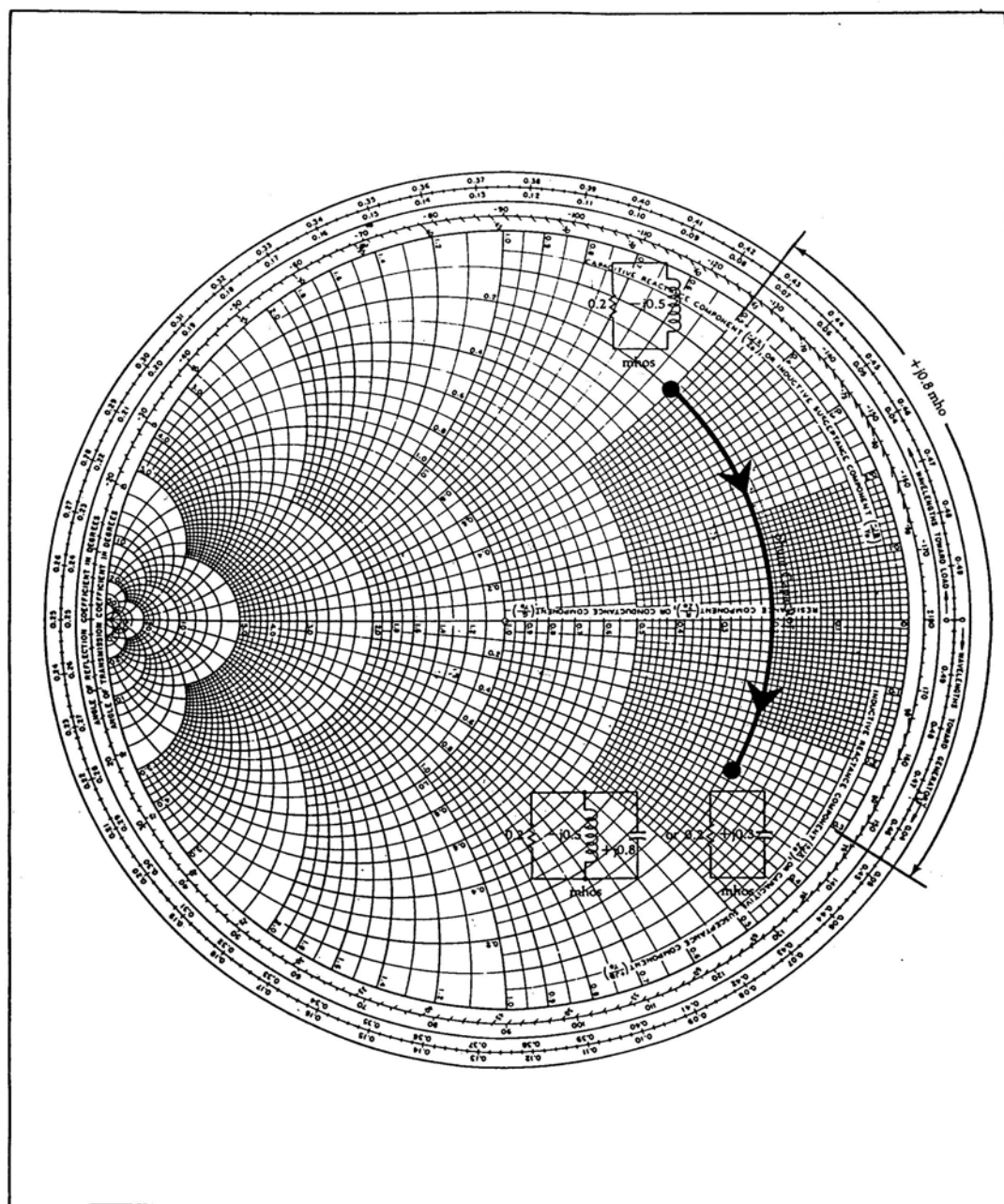


รูป 9.17 การแปลงอิมพีแดนซ์-แอดมิทแตนซ์ บนแผนภูมิสมิท

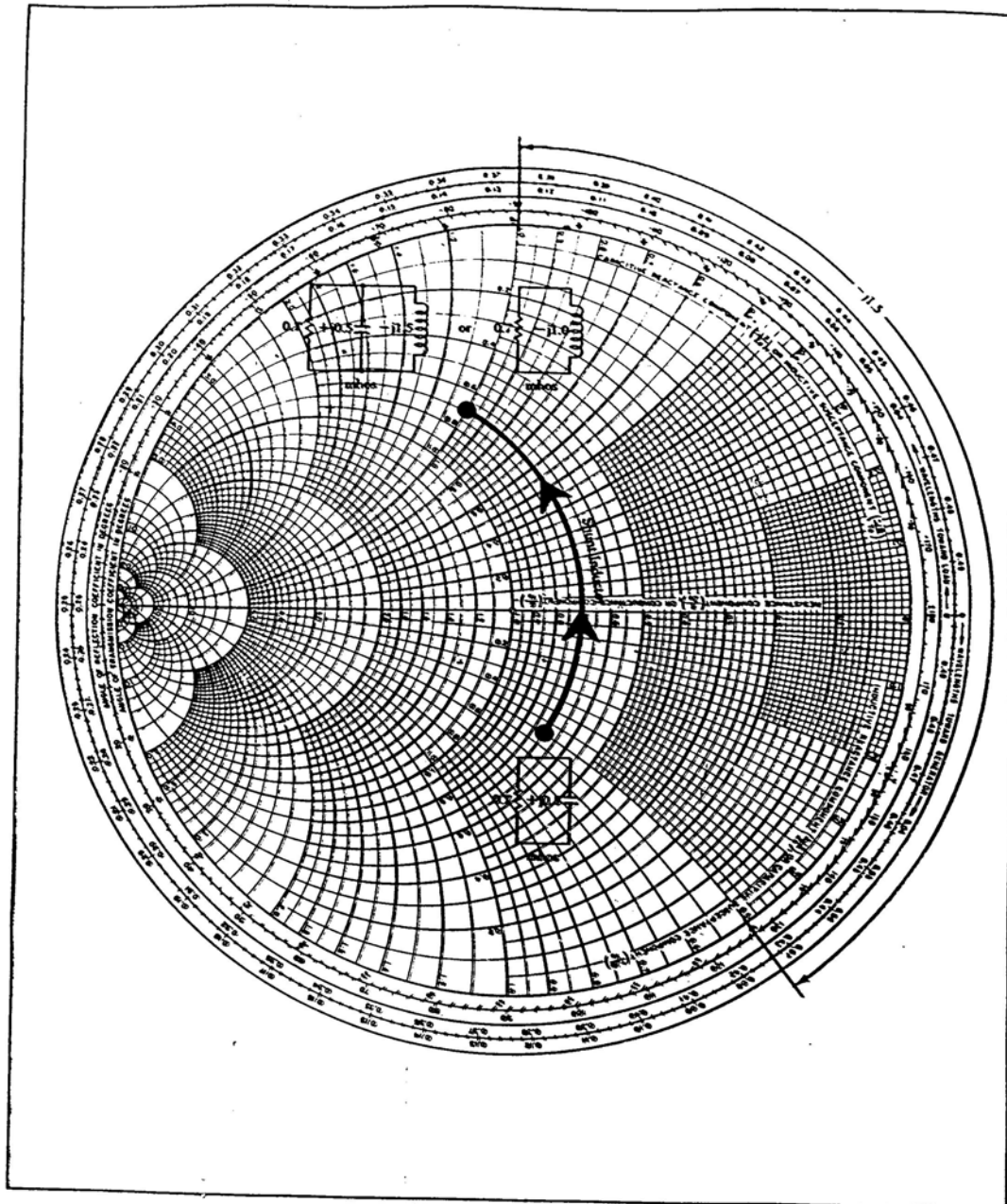


รูป 9.18 การกำหนดพิกัดค่าแอดมิทแตนซ์

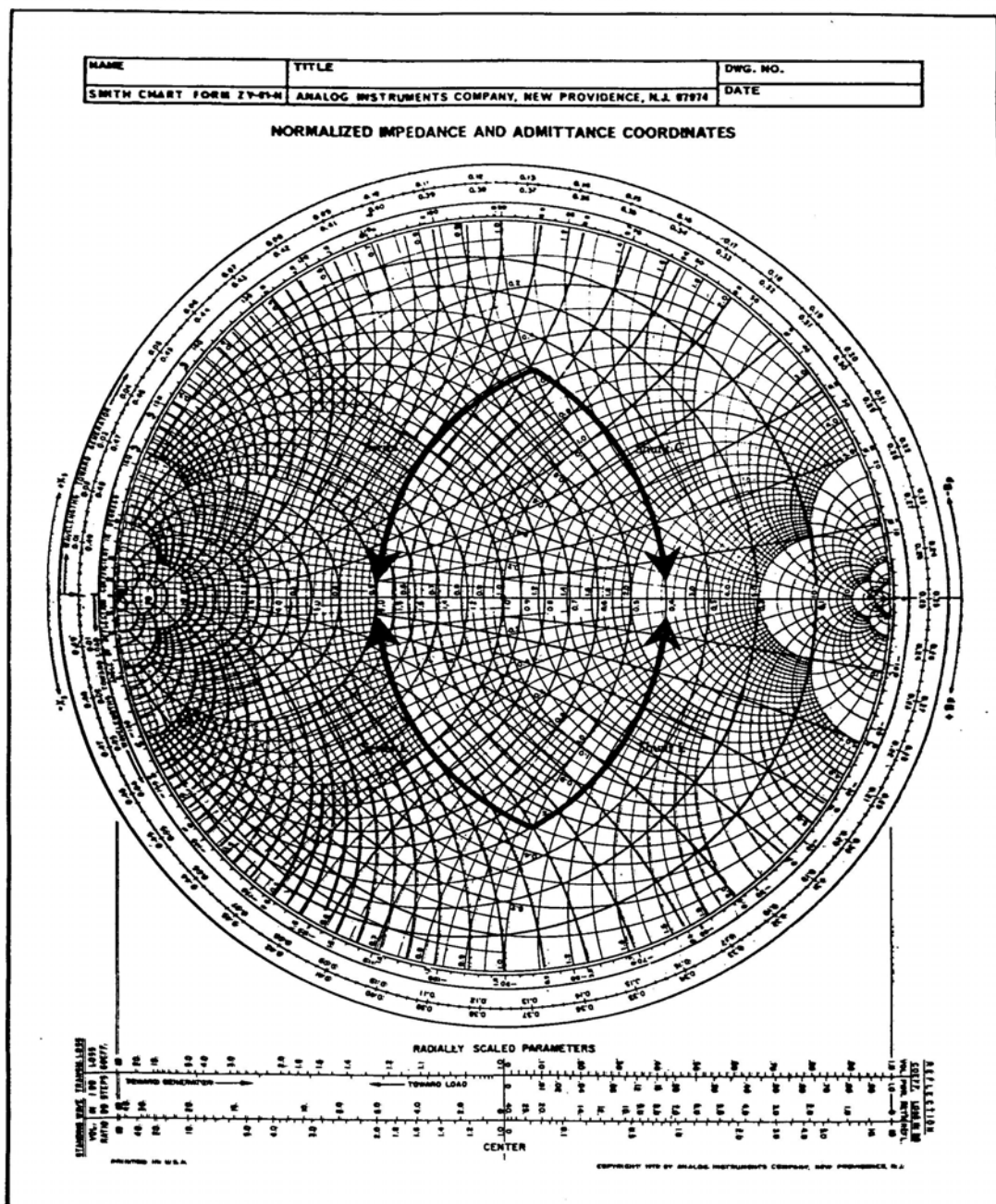




รูป 9.19 การเพิ่มตัวเก็บประจุแบบขนาน



รูป 9.20 การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำแบบขนาน

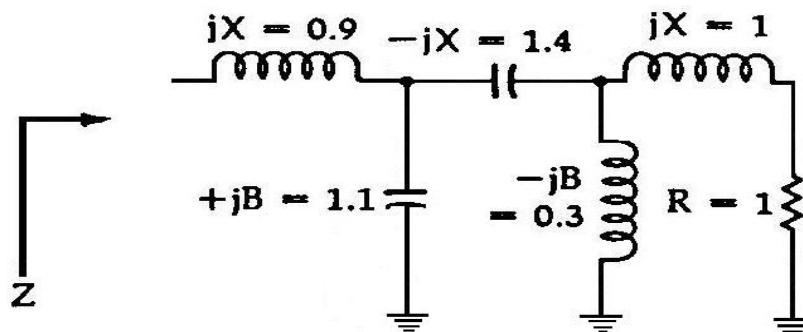


รูป 9.21 รูปการเพิ่มองค์ประกอบบนแผนภูมิสมิท

ถ้าเราใช้สมการในการคำนวณค่าที่ได้มาไม่ว่าจะเป็นค่าซัสเซพแตนซ์ หรือค่ารีแอคแตนซ์ ที่ได้นั้นจะเป็นค่าที่ยังไม่ได้ทำการนอร์มอลไลซ์ของอิมพีแดนซ์ เพราะเป็นค่าที่คำนวณได้ ค่าที่อ่านได้จาก แผนภูมิสมิท นั้นเป็นค่า ซัสเซพแตนซ์ (ที่ต่อแบบขนาน) และ ค่ารีแอคแตนซ์ (ที่ต่อแบบอนุกรม)

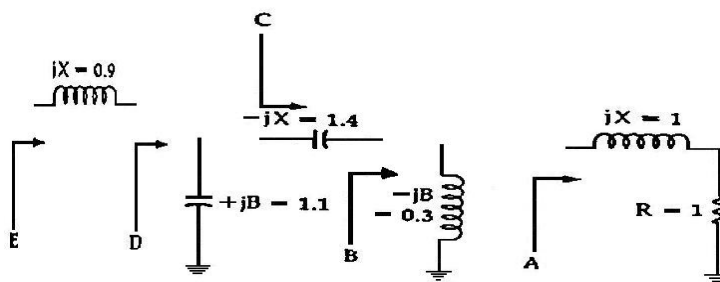
## ตัวอย่าง 4

ค่าอิมพีแดนซ์ที่แสดงอยู่ในรูป 9.22 มีค่าเท่าไรต้องบอกว่าเป็นการต่อแบบขนานของ ซ์สเซียพแดนซ์ หรือ การต่อแบบขนานของรีแอคแตนซ์



รูป 9.22 สำหรับตัวอย่าง 4

**วิธีทำ** จะต้องทำการคำนวณแล้วนำค่าไปพล็อตในแผนภูมิสมิท ที่ทำการแมทช์เรียบร้อยแล้วตามรูป 9.24 สิ่งแรกที่ต้องทำคือ นำจุดแต่ละจุดในวงจรไปพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ ที่ทำการต่อค่า RL แบบอนุกรมตามรูป 9.23 ที่  $Z = 1 + j1$  แล้วพล็อตจุด A ต่อจากนั้นลากเส้นเพื่อออกแบบตามที่เรต้องการตามรูป 9.24 แล้วหาจุดเชื่อมต่อกันนั้นก็อ่านค่าของจุดนั้น (9.24)



รูป 9.23 การแบ่งวงจรออกเป็นแต่ละองค์ประกอบ

รูป 9.23 แสดงรูปวงจรที่ทำการออกแบบแล้ว

Arc AB = ขนาน L =  $-jB = 0.3$  โอห์ม

Arc BC = อนุกรม C =  $-jX = 1.4$  โอห์ม

Arc CD = ขนาน C =  $+jB = 1.1$  โอห์ม

Arc DE = อนุกรม L =  $+jX = 0.9$  โอห์ม

ค่าอิมพีแดนซ์ ที่จุด E สามารถอ่านค่าได้จาก แผนภูมิสมิทรูปที่ 9.24 ได้  $Z = 0.2 + j0.5$  โอห์ม



### ตัวอย่าง 5

ให้ออกแบบเครือข่าย Two-องค์ประกอบ การแมทช์อิมพีแดนซ์ บน แผนภูมิสมิท ให้แมทช์ ที่  $25-j15$  โอห์ม ฟังก์ชันกำลังการันต์ และ  $100-j25$  โอห์ม ทางฝั่งโหลด ที่ความถี่ 60 MHz ให้ทำการแมทช์ โดยต้องใช้แบบ ความถี่ต่ำผ่าน filter ระหว่างทางฝั่งโหลดและฟังก์ชันกำลังการันต์

**วิธีทำ** ค่า อิมพีแดนซ์ ที่ให้มานั้นยังไม่ได้ทำการ นอร์มอลไลซ์ ให้ออกแบบที่  $N=50$  ดังนั้นจะได้ค่า อิมพีแดนซ์ทางฝั่งโหลดเป็น  $2-j0.5$  โอห์ม และค่า อิมพีแดนซ์ ทางฝั่งฟังก์ชันกำลังการันต์เป็น  $0.5-j0.3$  โอห์ม แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตบน แผนภูมิสมิท ซึ่งแสดงตามรูป 9.26 โดยที่จุด A,  $Z_L$  คือ นอร์มอลไลซ์ อิมพีแดนซ์ของโหลด และจุด C,  $Z_S$  คือ นอร์มอลไลซ์ คอนจูเกตเชิงซ้อน ของ อิมพีแดนซ์ ทางฝั่งฟังก์ชันกำลังการันต์

และทำการ แมทช์ ให้เป็นแบบวงจรรองความถี่ต่ำผ่านโดยออกแบบจากการอนุกรม L, ขนาน C โดยเส้นทางที่จะลากไปนั้นเราจะลากจากจุด A ไปยังจุด C ซึ่งแสดงดังรูป 9.26 สำหรับค่าของ Arc AB ตามรูป 9.26 คือการต่อตัวเก็บประจุแบบขนานกับค่า  $+jB=0.73$  โอห์ม และค่าของ Arc BC คือการต่อตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรมกับค่า  $+jX=1.2$  โอห์ม

จาก แผนภูมิสมิท ซึ่งอ่านได้ค่าตัวเก็บประจุแบบขนานซึ่งเป็นค่ารีแอคแตนซ์ แต่เราต้องการค่า รีแอคแตนซ์ ดังนั้นจึงต้องคำนวณค่าจาก

$$\begin{aligned} X_C &= 1/+jB \\ &= 1/j0.73 \\ &= -j1.37 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

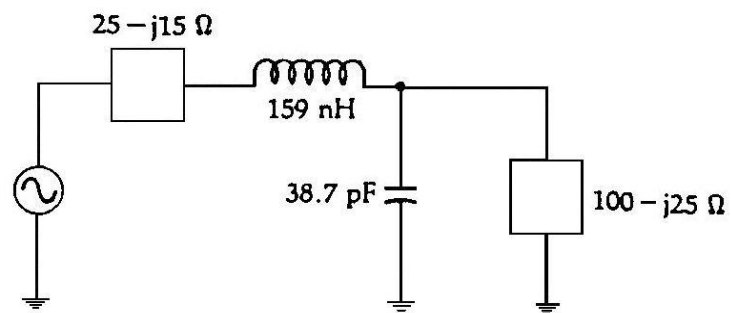
วงจรที่สมบรูณ์นั้นเราต้องทำการ นอร์มอลไลซ์ ค่า อิมพีแดนซ์ ทั้งหมดก่อน โดยที่ค่า  $N=50$  ซึ่งค่าที่ใช้คือ

$$\begin{aligned} X_L &= 60 \text{ โอห์ม} \\ X_C &= 68.5 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

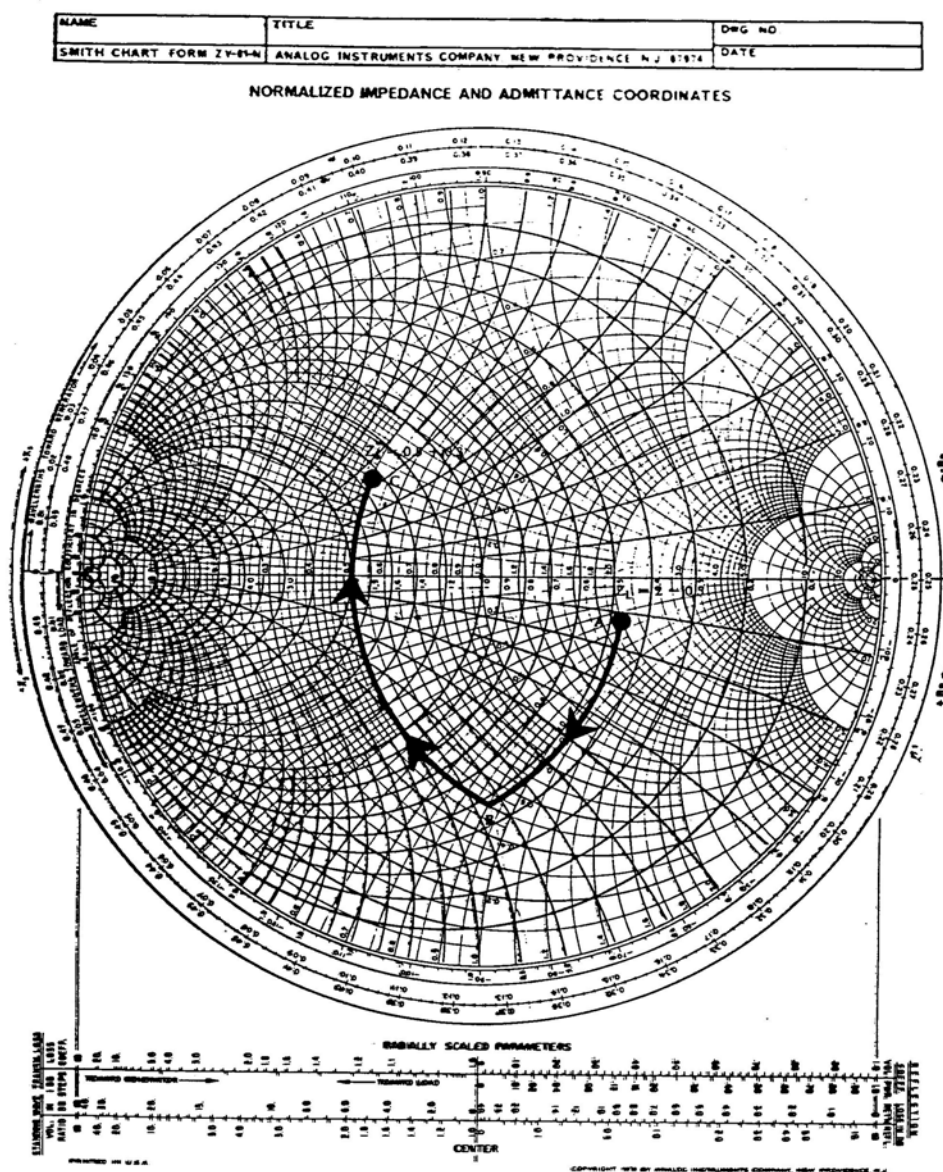
สามารถทำการหาค่า รีแอคแตนซ์ ได้โดย

$$\begin{aligned} L &= X_L/\omega \\ &= 60/[2\pi \times (60 \times 10^6)] \\ &= 159 \text{ nH} \\ C &= 1/\omega X_C \\ &= 1/[2\pi \times (60 \times 10^6) (68.5)] \\ &= 38.7 \text{ pF} \end{aligned}$$

วงจรสุดท้ายที่สมบูรณ์แล้ว



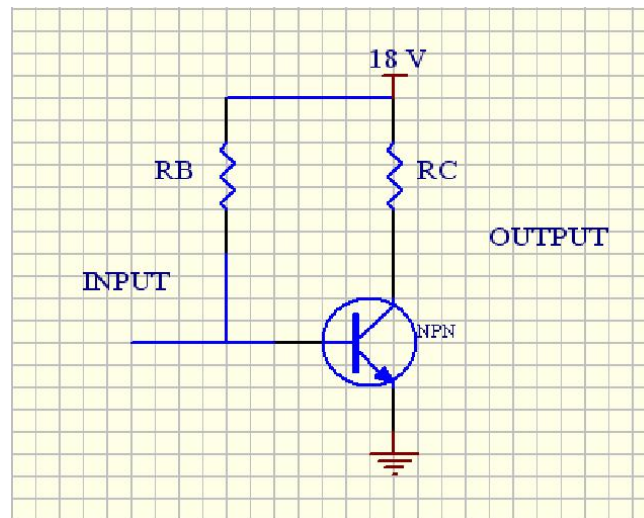
รูป 9.25 วงจรสุดท้ายสำหรับตัวอย่าง 5



รูป 9.26 แสดงวิธีทำของตัวอย่าง 5

### ตัวอย่าง6 การออกแบบ Amplifier โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2SC3355

เลือกวงจร Amplifier Class A ให้  $V_{cc} = 18\text{ V}$



รูป 9.27 รูปแบบวงจร Amplifier Class A

ข้อมูลที่ได้จาก Data Sheet

$$V_{cc} = 10\text{V}, \quad I_C = 20\text{ mA}, \quad Z_0 = 50\text{ โอห์ม}, \quad B = 120$$

$$I_C = I_B = 20\text{ mA}$$

$$I_B = 166.67\text{ }\mu\text{A}$$

INPUT

$$V_{cc} = I_B R_B + V_{BE}$$

$$18\text{ V} = (166.67\text{ }\mu\text{A}) R_B + 0.7$$

$$R_B = 103.8\text{ k}\Omega$$

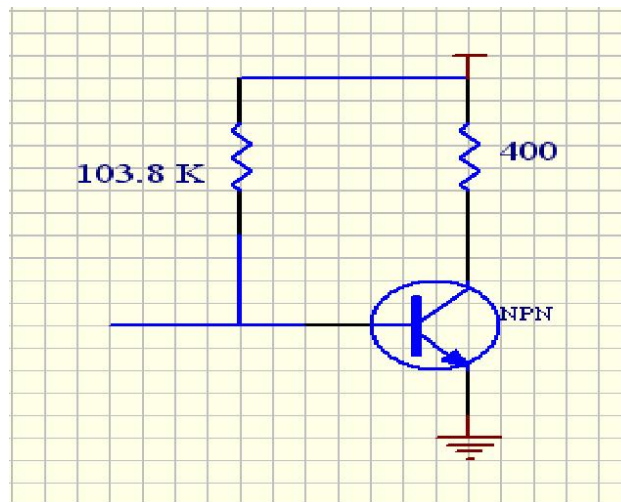
OUTPUT

$$V_{cc} = I_C R_C + V_{CE}$$

$$R_C = 400\Omega$$

จะได้วงจร Amplifier Class A คือ





รูปที่ 9.28 วงจร Amplifier Class A ที่ออกแบบ

ออกแบบวงจร Matching ที่ความถี่ 600 MHz,  $Z_0 = 50 \Omega$

ค่า S-parameter จาก datasheet

$$S_{11} = 0.013 \angle -57.9$$

$$S_{21} = 4.936 \angle 74.0$$

$$S_{12} = 0.113 \angle 69.3$$

$$S_{22} = 0.428 \angle -30.8$$

แปลงเป็นค่า Z - Parameter จากสูตร

$$Z_{11} = Z_0 \left[ \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{\Psi_1} \right]$$

$$Z_{22} = Z_0 \left[ \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{\Psi_1} \right]$$

$$Z_{12} = Z_0 \left( \frac{2S_{12}}{\Psi_1} \right)$$

$$Z_{21} = Z_0 \left( \frac{2S_{21}}{\Psi_1} \right)$$

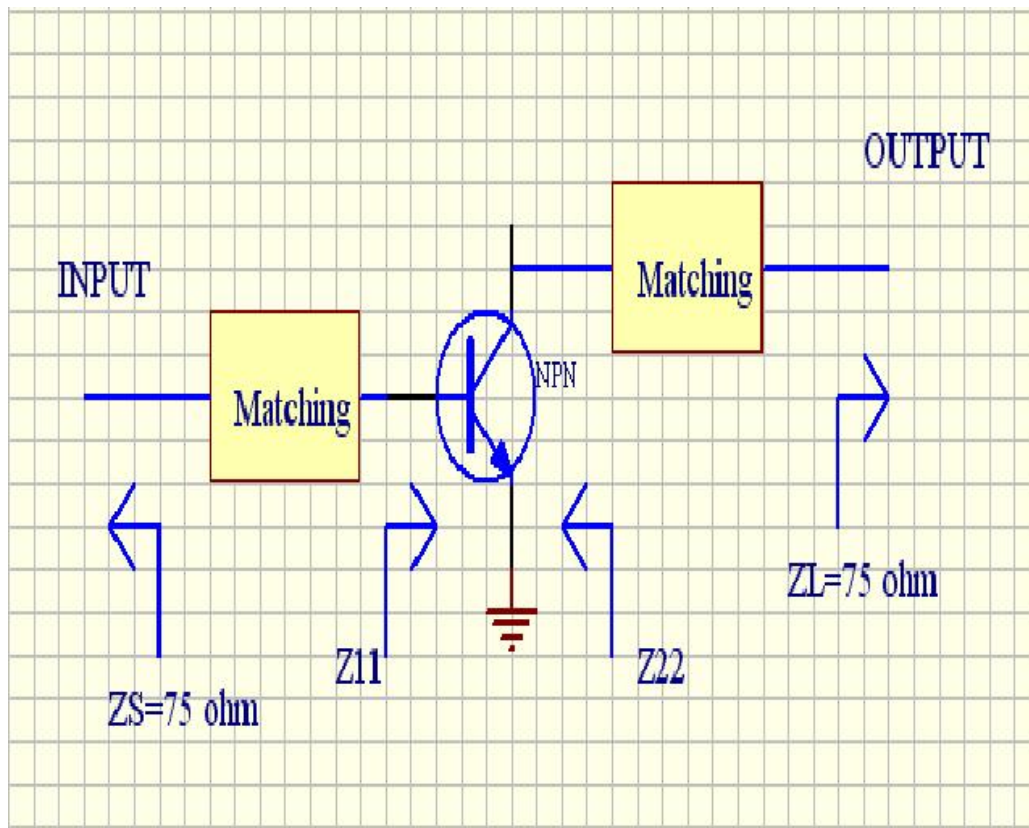
$$\Psi_1 = (1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}$$

จะได้  $Z_{11} = 6.33 + j450.23$

$$Z_{21} = 81.36 + j450.23$$

$$Z_{12} = 2.7 + j10.13$$

$$Z_{22} = 41.57 + j10.27$$



รูปที่ 9.29 รูปแบบวงจรแมตชิง

Normalize ด้วย 50

$$Z_S^* = \frac{75}{50} = 1.5$$

$$Z_{11} = 0.13 + j0.52$$

$$Z_L^* = \frac{75}{50} = 1.5$$

$$Z_{22} = 0.83 + j0.21$$

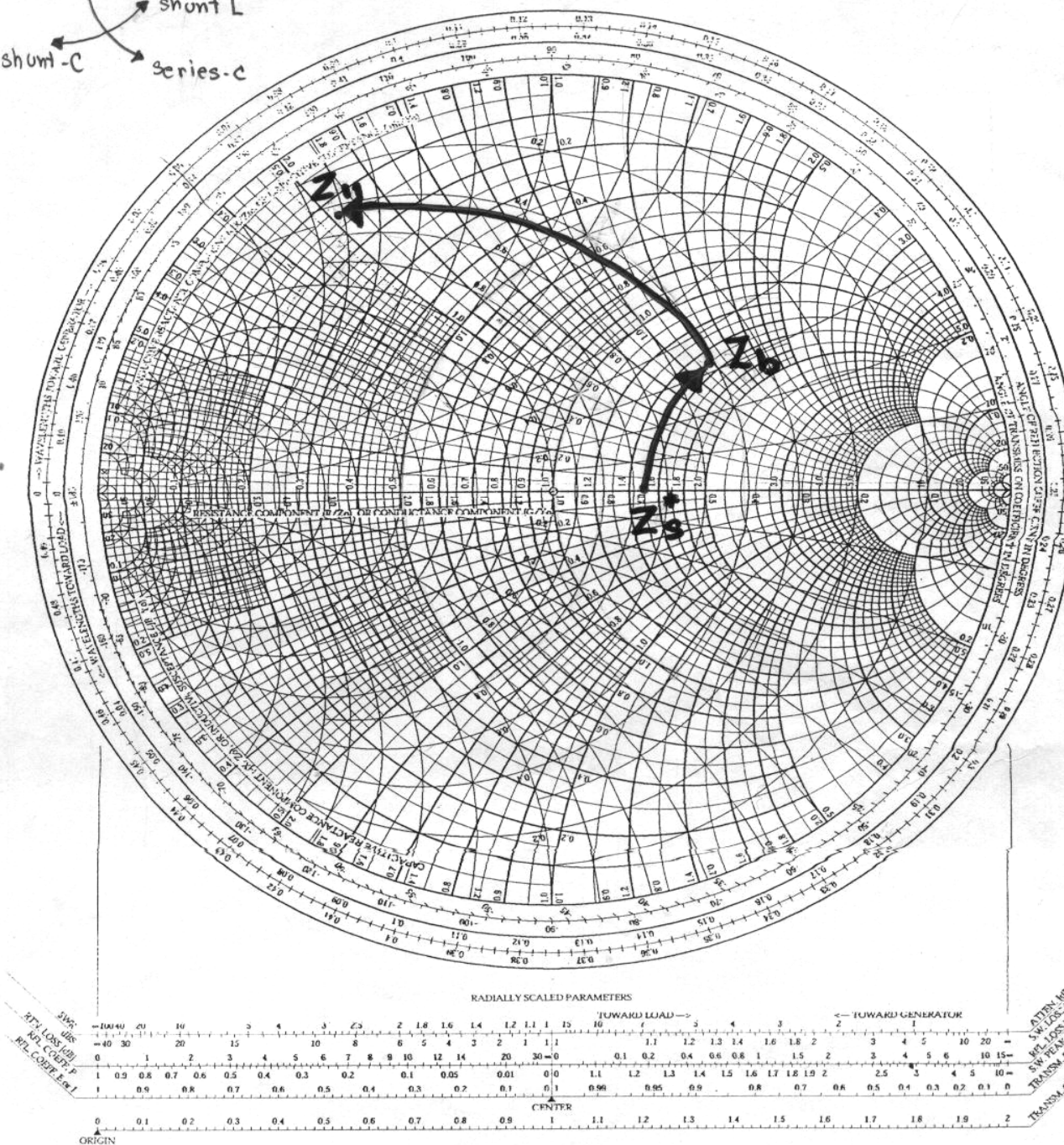
INPUT มองจาก Source ไป Load  $Z_S^* \text{----} Z_B \text{----} Z_{11}$

จาก Smith chart  $Z_B = 1.5 + j1.18$

NAME	TITLE	DWG. NO.
SMITH CHART FORM ZY-01-N	Microwave Circuit Design - EE523 - Fall 2000	DATE

serie-L  
 shunt-L  
 shunt-C  
 series-C

# NORMALIZED IMPEDANCE AND ADMITTANCE COORDINATES



Series-L;

$$Z_B - Z_S^* = +j1.18$$

$$X_L(Z_0) = 2\pi fL$$

$$L = \frac{(1.18)(50)}{2\pi(600M)} = 15.56nH$$

Shunt-L;

$$Y_{11} - Y_B = \left(\frac{1}{Z_{11}}\right) - \left(\frac{1}{Z_B}\right) = -j1.49$$

$$\left[\frac{1}{\beta}\right][Z_0] = 2\pi fL$$

$$L = 8.9nH$$

OUTPUT มองจาก Load ไป Source  $Z_L^* \rightarrow Z_B \rightarrow Z_{22}$

จาก Smith chart  $Z_B = 0.83 + j0.75$

Shunt-L;

$$Y_B - Y_L^* = \left(\frac{1}{Z_B}\right) - \left(\frac{1}{Z_L^*}\right) = -j0.6$$

$$\left[\frac{1}{\beta}\right][Z_0] = 2\pi fL$$

$$L = 22.1nH$$

Series-C;

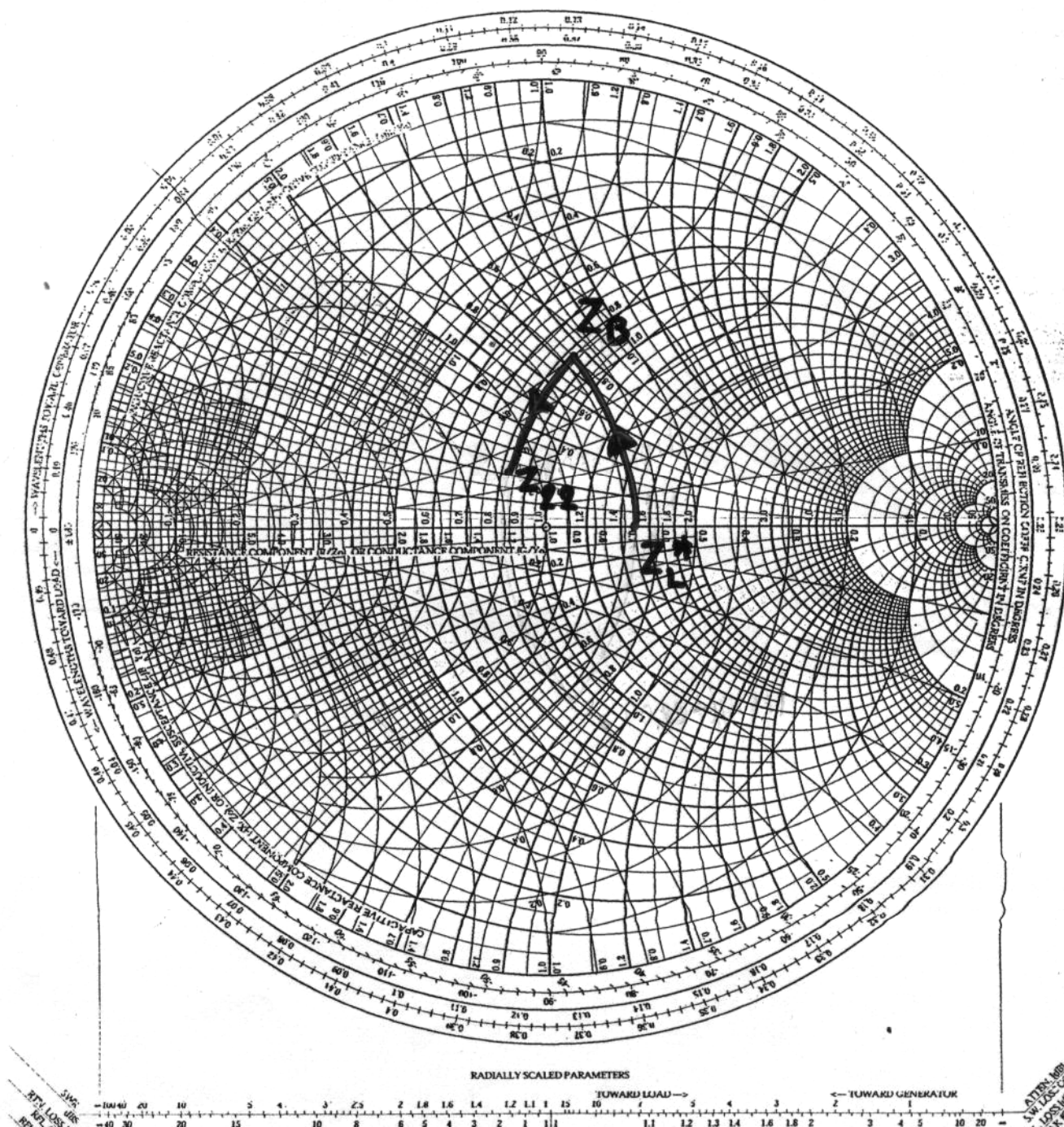
$$Z_{22} - Z_B = -j0.54$$

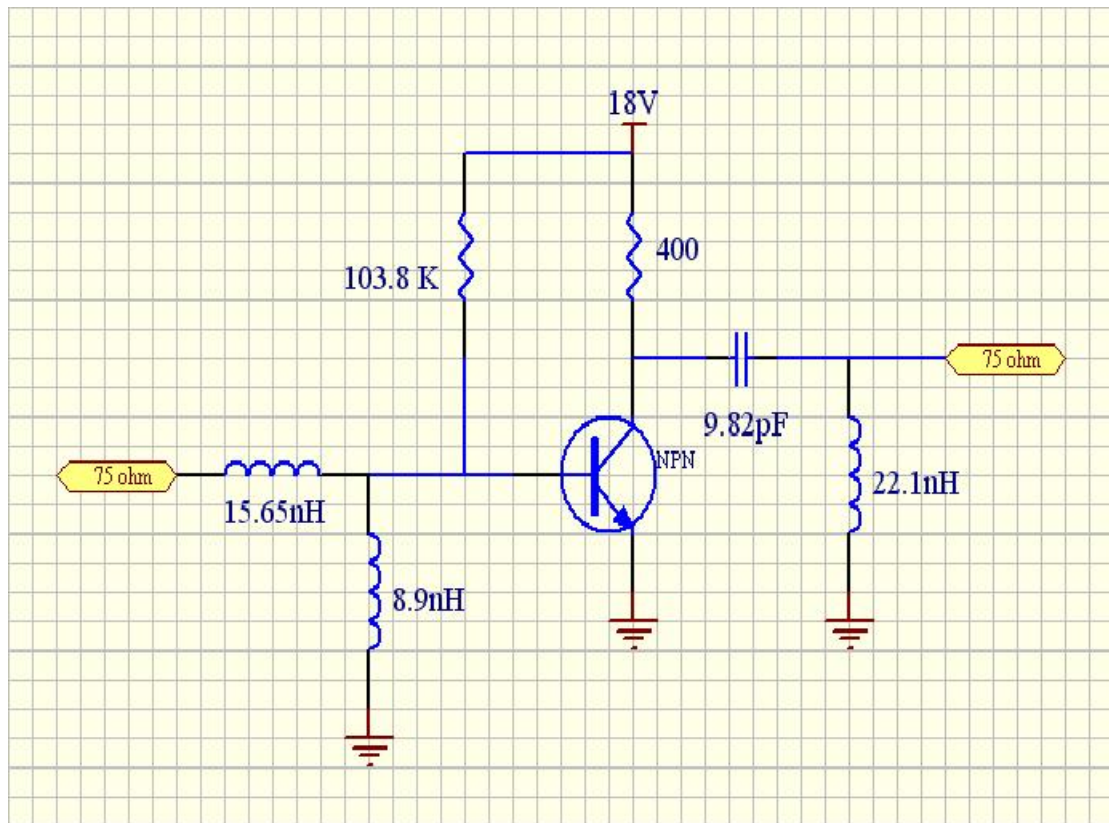
$$X_C(Z_0) = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$C = 9.82pF$$

NAME	TITLE	DWG. NO.
SMITH CHART FORM ZY-01-N	Microwave Circuit Design - EE523 - Fall 2000	DATE

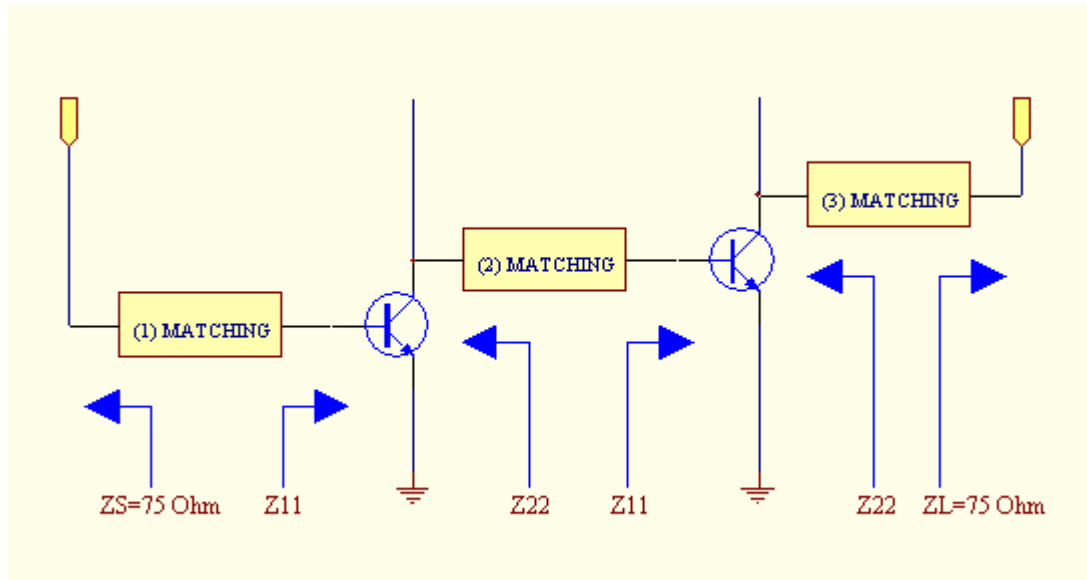
### NORMALIZED IMPEDANCE AND ADMITTANCE COORDINATES





รูปที่ 9.30 วงจร Amplifier Class A ที่ความถี่ 600MHz ที่ได้จากการออกแบบ

**ตัวอย่างที่ 7** ออกแบบวงจรขยายสัญญาณ โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2SC3355 อ้างอิงจากตัวอย่างที่ 6 แต่ในตัวอย่างนี้จะออกแบบวงจร 2 state เพื่อเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้มากขึ้น ที่ความถี่ 600MHz,  $Z_0=50$  โอห์ม



รูปที่ 9.31 รูปแบบวงจร Matching 2 state ความถี่ 600MHz

คำนวณหา Z-Parameter เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 6

$$\text{จะได้ } Z_{11} = 6.33 + j450.23$$

$$Z_{21} = 81.36 + j450.23$$

$$Z_{12} = 2.7 + j10.13$$

$$Z_{22} = 41.57 + j10.27$$

Normalize ด้วย 50

$$Z_S^* = \frac{75}{50} = 1.5$$

$$Z_{11} = 0.13 + j0.52$$

$$Z_L^* = \frac{75}{50} = 1.5$$

$$Z_{22} = 0.83 + j0.21$$

(1) Matching มองจาก Source ไป Load  $Z_S^* \text{----} Z_B \text{----} Z_{11}$

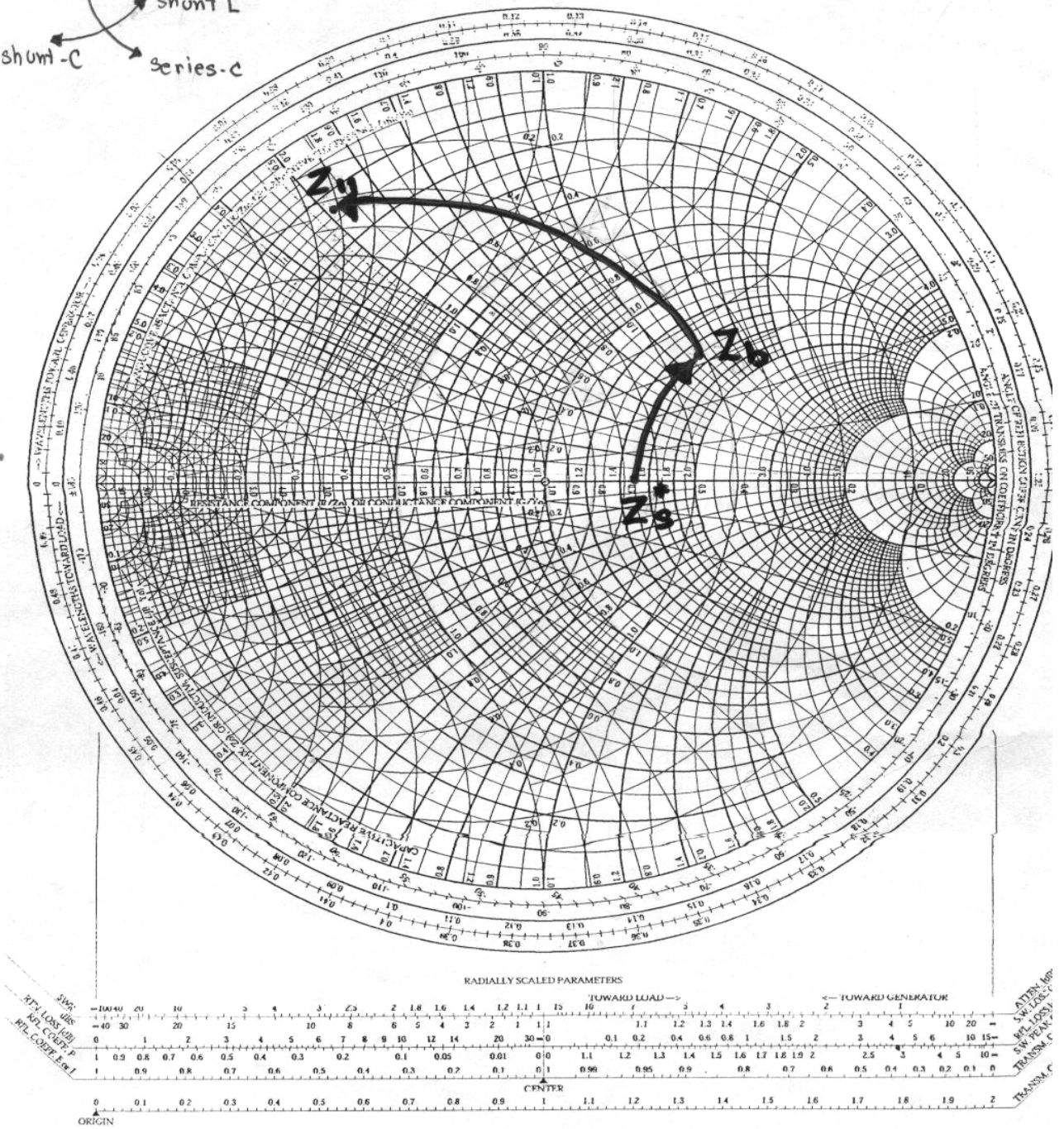
จาก Smith chart  $Z_B = 1.5 + j1.18$



NAME	TITLE	DWG. NO.
SMITH CHART FORM ZY-01-N	Microwave Circuit Design - EE523 - Fall 2000	DATE

series-L  
 shunt-L  
 shunt-C  
 series-C

# NORMALIZED IMPEDANCE AND ADMITTANCE COORDINATES





Series-L;

$$Z_B - Z_S^* = +j1.18$$

$$X_L(Z_0) = 2\pi fL$$

$$L = \frac{(1.18)(50)}{2\pi(600M)} = 15.56nH$$

Shunt-L;

$$Y_{11} - Y_B = \left(\frac{1}{Z_{11}}\right) - \left(\frac{1}{Z_B}\right) = -j1.49$$

$$\left[\frac{1}{\beta}\right][Z_0] = 2\pi fL$$

$$L = 8.9nH$$

(2) Matching มอذجจก Source 1 Load  $Z_{22}^*$  ----- $Z_B$ ----- $Z_{11}$

จก Smith chart  $Z_B = 0.83 + j1.1$

$$Z_{22}^* = 0.83 - j0.21$$

Series-L;

$$Z_B - Z_{22}^* = j1.31$$

$$X_L(Z_0) = 2\pi fL$$

$$L = 17.37 \text{ nH}$$

Shunt-L;

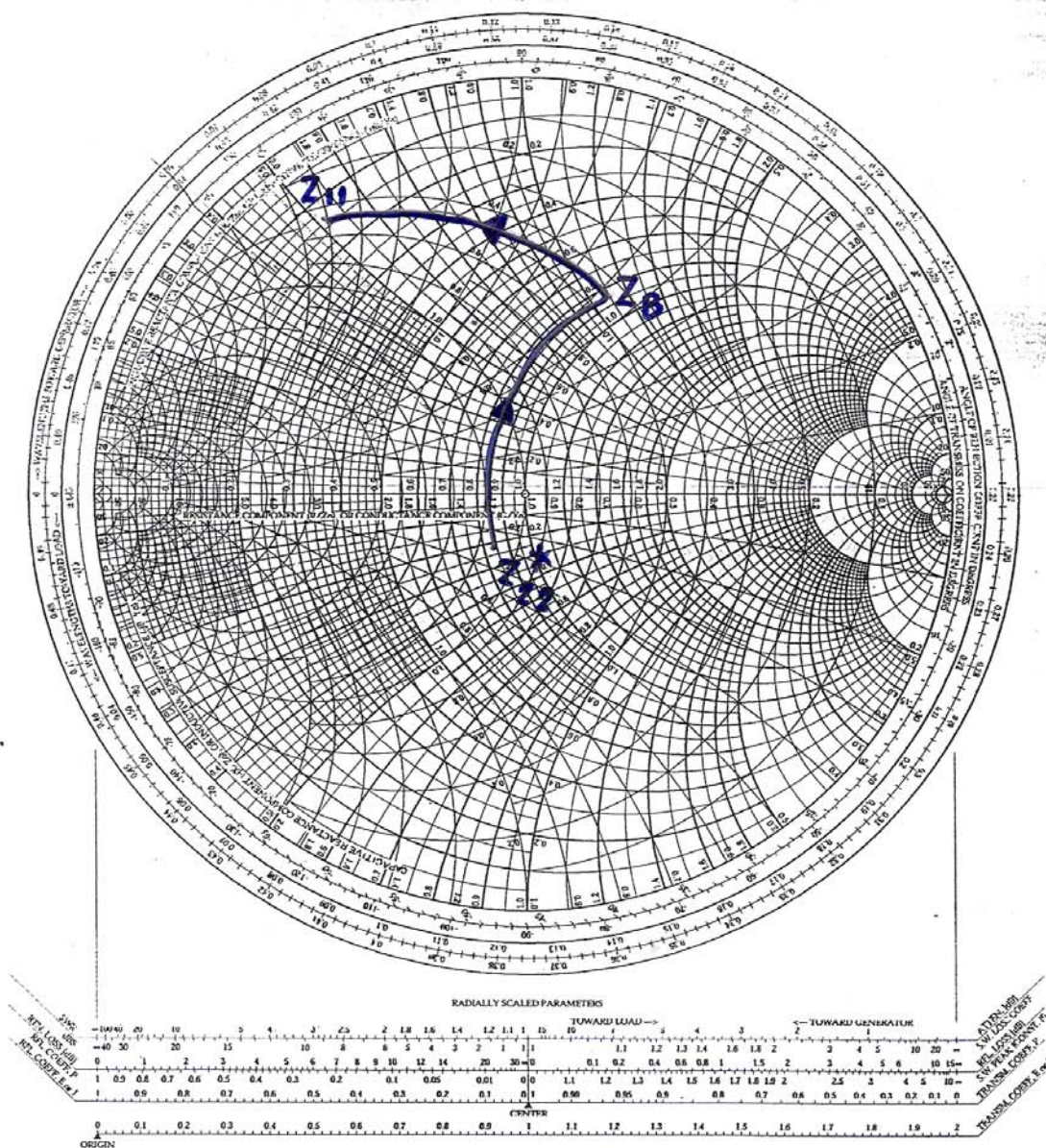
$$Y_{11} - Y_B = (1/Z_{11}) - (1/Z_B) = -j1.23$$

$$[1/B][Z_0] = 2\pi fL$$

$$L = 10.78 \text{ nH}$$

NAME	TITLE	DWG. NO.
SMITH CHART FORM ZY-01-N	Microwave Circuit Design - EE523 - Fall 2000	DATE

### NORMALIZED IMPEDANCE AND ADMITTANCE COORDINATES



(3) Matching ให้อิมพีแดนซ์ Load ใกล้เคียง Source  $Z_L^* \rightarrow Z_B \rightarrow Z_{22}$

จาก Smith chart  $Z_B = 0.83 + j0.75$

Shunt-L;

$$Y_B - Y_L^* = \left(\frac{1}{Z_B}\right) - \left(\frac{1}{Z_L^*}\right) = -j0.6$$

$$\left[\frac{1}{\beta}\right][Z_0] = 2\pi fL$$

$$L = 22.1 \text{ nH}$$

Series-C;

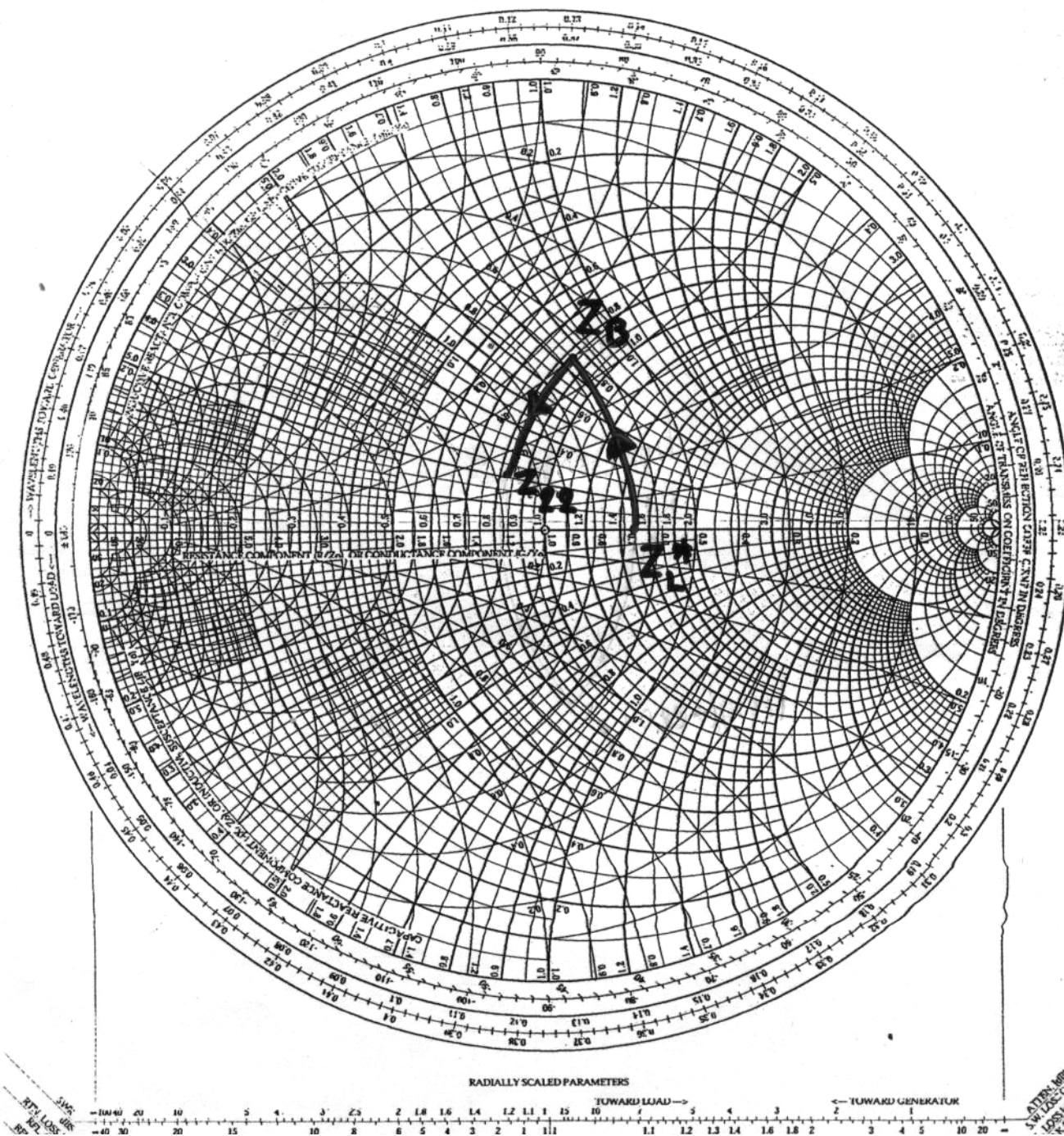
$$Z_{22} - Z_B = -j0.54$$

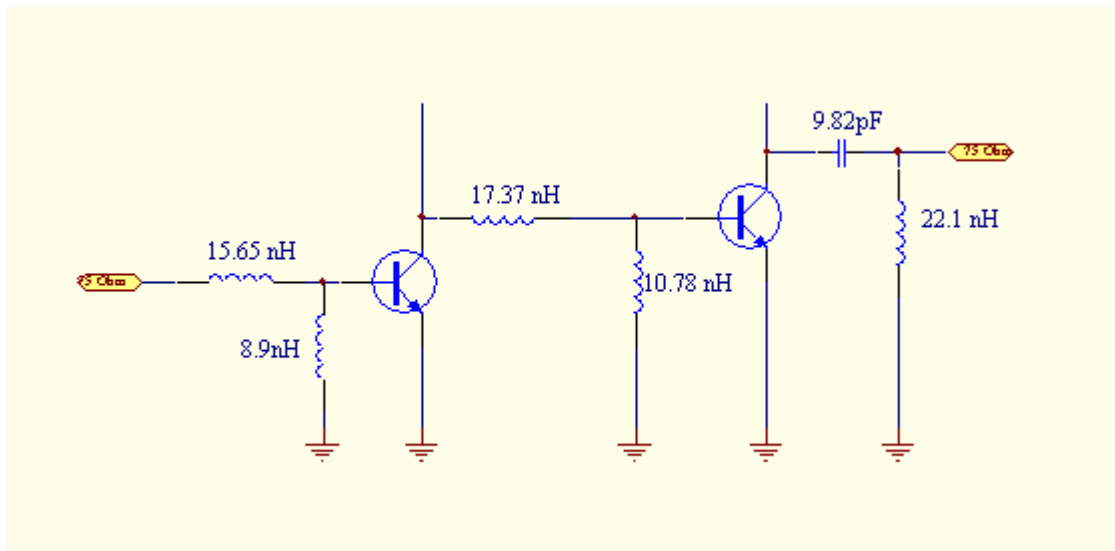
$$X_C(Z_0) = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$C = 9.82 \text{ pF}$$

NAME	TITLE	DWG. NO.
SMITH CHART FORM ZY-01-N	Microwave Circuit Design - EE523 - Fall 2000	DATE

### NORMALIZED IMPEDANCE AND ADMITTANCE COORDINATES





รูปที่ 9.32 วงจรแมตซ์ชิง 2 State ที่ความถี่ 600 MHz ที่ได้จากการออกแบบ

### สรุป

การทำ การแมตซ์อิมพีแดนซ์ ไม่ใช่การทำทีเดียวเสร็จ แต่จะต้องทำทีละขั้นตอน ซึ่งถ้าเรามีความเข้าใจเราก็สามารถใช้หาค่ากำลังงานสูงสุดจากแหล่งกำเนิดถึงโหลดได้ การแมตซ์อิมพีแดนซ์นั้นสามารถทำการออกแบบโดยการคำนวณหรือการใช้การออกแบบในแผ่นภูมิสมิธได้ ส่วนระบบที่มี 2 องค์ประกอบ และ 3 องค์ประกอบ นั้นส่วนมากจะสามารถคำนวณค่าด้วยมือได้ดี ในขณะเดียวกันถ้าเป็นระบบที่ 4 องค์ประกอบ หรือมากกว่าให้ทำการออกแบบโดยใช้ แผ่นภูมิสมิธจะสามารถออกแบบได้ง่ายกว่าการคำนวณด้วยมือ

## บทที่ 10

### การออกแบบส่วนประกอบของวงจรบูสเตอร์

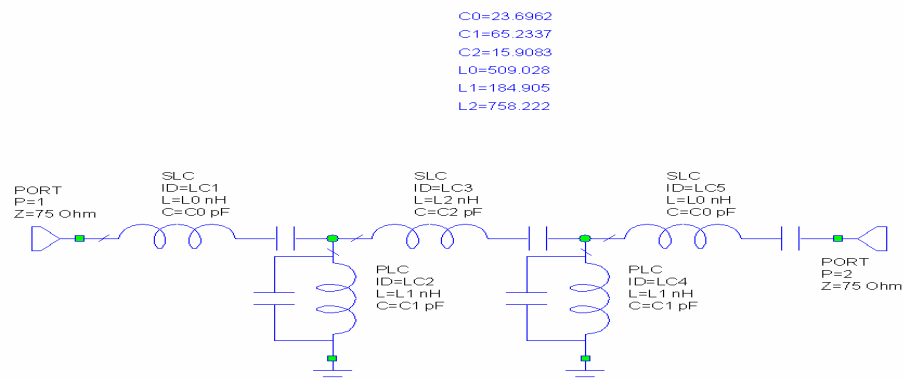
ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน

ส่วนที่หนึ่ง การออกแบบวงจรกรองความถี่ฟิวเตอร์ ตามย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ด้วยโปรแกรมการคำนวณฟิวเตอร์ (ศึกษาหลักการใช้โปรแกรมที่ภาคผนวก)

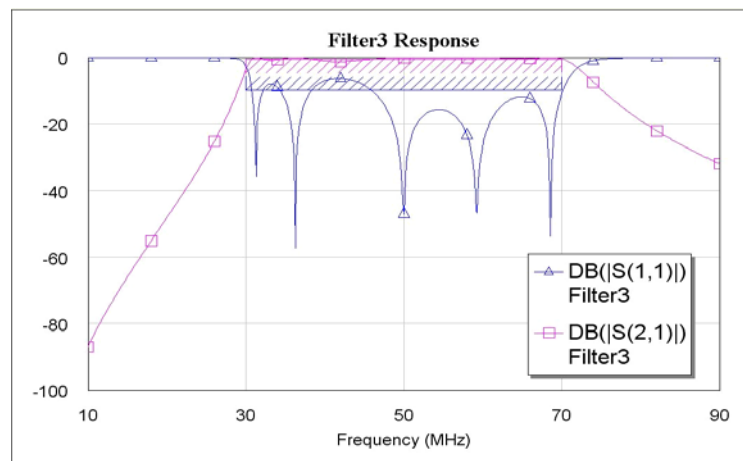
1. วงจรกรองความถี่ (Bandpass filter) ในช่วงความถี่ย่าน Low VHF  
30 MHz - 70 MHz
2. วงจรกรองความถี่ (Lowpass filter) ที่  $f_c = 250$  MHz
3. วงจรกรองความถี่ (Bandpass filter) ในช่วงความถี่ VHF 160 MHz - 230 MHz
4. วงจรกรองความถี่ (Highpass filter) ที่  $f_c = 300$  MHz
5. วงจรกรองความถี่ (Highpass filter) ที่  $f_c = 400$  MHz

## การออกแบบวงจรกรองความถี่ (Filter) 75 Ohm

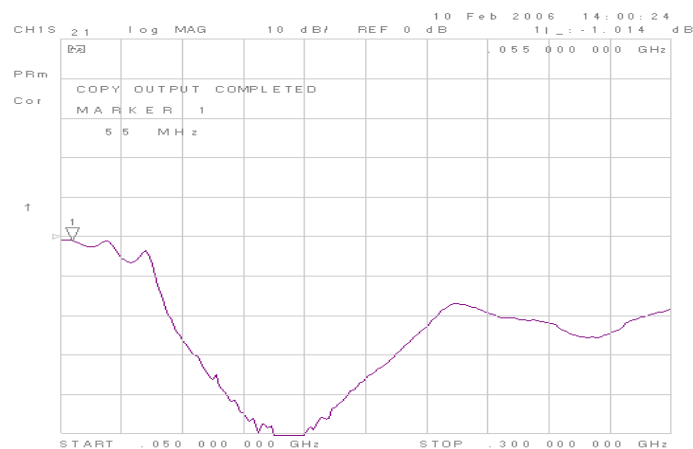
### 1. วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน (Band Pass Filter) ความถี่ 30-70 MHz ((AE1 EQ))



รูปที่10.1 วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 30-70 MHz



รูปที่10.2 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 30-70 MHz



รูปที่10.3 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 30-70 MHz

จากสูตรของการพันตัวเหนี่ยวนำ

$$L_0 = 494 \text{ nH} \quad a=5, b=8, c=0.25, n=15$$

$$L_1 = 180 \text{ nH} \quad a=5, b=4, c=0.25, n=7$$

$$L_2 = 745 \text{ nH} \quad a=5, b=11, c=0.25, n=21$$

ค่าของคาปาซิเตอร์ที่ใช้

$$C_0 = 22 \text{ pF}$$

$$C_1 = 68 \text{ pF}$$

$$C_2 = 15 \text{ pF}$$

**\*\*ค่า L ที่ได้จากคำนวณ โดย**

a = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

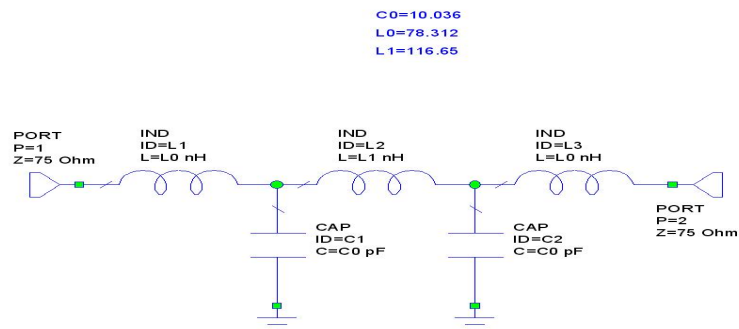
b = ความยาวของขดลวด

c = ความหนาหรือเบอร์ของเส้นลวด

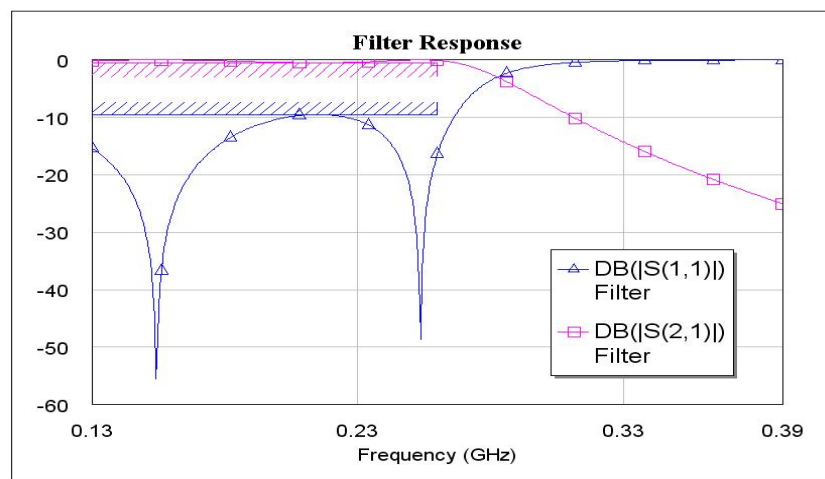
n = จำนวนรอบของเส้นลวด



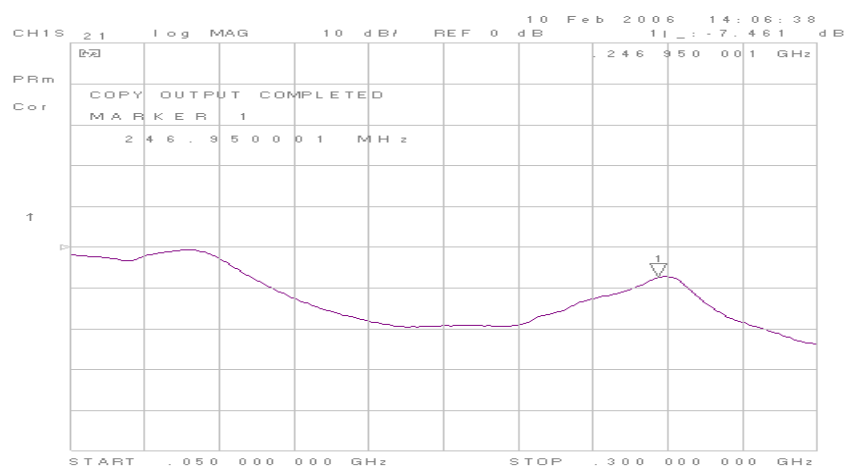
## 2. วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ความถี่ 250 MHz ((AE2))



รูปที่ 10.4 วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ 250 MHz



รูปที่ 10.5 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ 250 MHz



รูปที่ 10.6 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ 250 MHz

ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้จริงในวงจร

$C_0 = 10 \text{ pF}$

$L_0 = 75 \text{ nH}$                        $a=4, b=3, c=0.25, n=5$

$L_1 = 116.6 \text{ nH}$                        $a=5, b=3, c=0.25, n=5$

**\*\*ค่า L ที่ได้จากคำนวณ โดย**

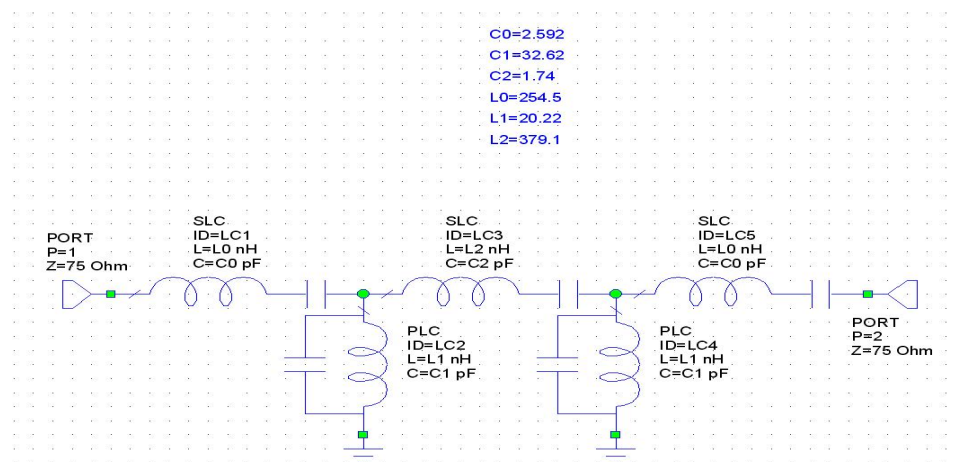
$a$  = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

$b$  = ความยาวของขดลวด

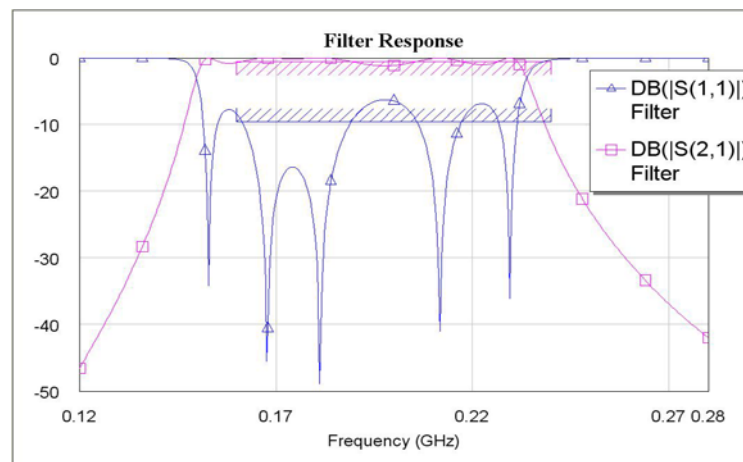
$c$  = ความหนาหรือเบอร์ของเส้นลวด

$n$  = จำนวนรอบของเส้นลวด

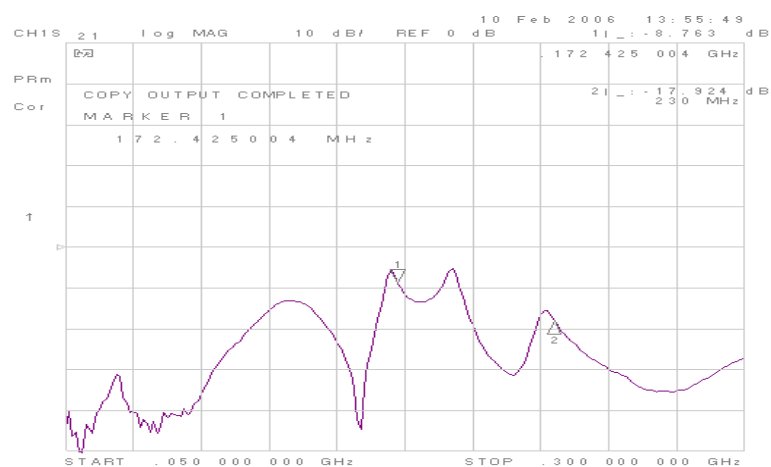
### 3. วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน (Band Pass Filter) ความถี่ 160-230 MHz ((V\_X1))



รูปที่ 10.7 วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 160-230 MHz



รูปที่ 10.8 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 160-230 MHz



รูปที่ 10.9 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 160-230 MHz

จากสูตรของการพัวตัวเหนี่ยวนำ

$$L_0 = 275 \text{ nH} \quad a=5, b=6, c=0.25, n=10$$

$$L_1 = 21.4 \text{ nH} \quad a=4, b=1, c=0.25, n=2$$

$$L_2 = 371.7 \text{ nH} \quad a=5, b=8, c=0.25, n=13$$

ค่าของคาปาซิเตอร์ที่ใช้

$$C_0 = 2.7 \text{ pF}$$

$$C_1 = 33 \text{ pF}$$

$$C_2 = 2 \text{ pF}$$

**\*\*ค่า L ที่ได้จากคำนวณ โดย**

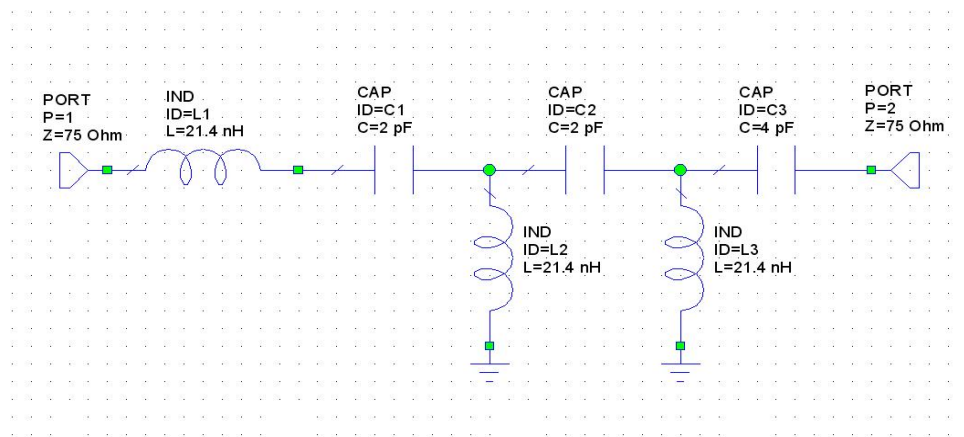
a = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

b = ความยาวของขดลวด

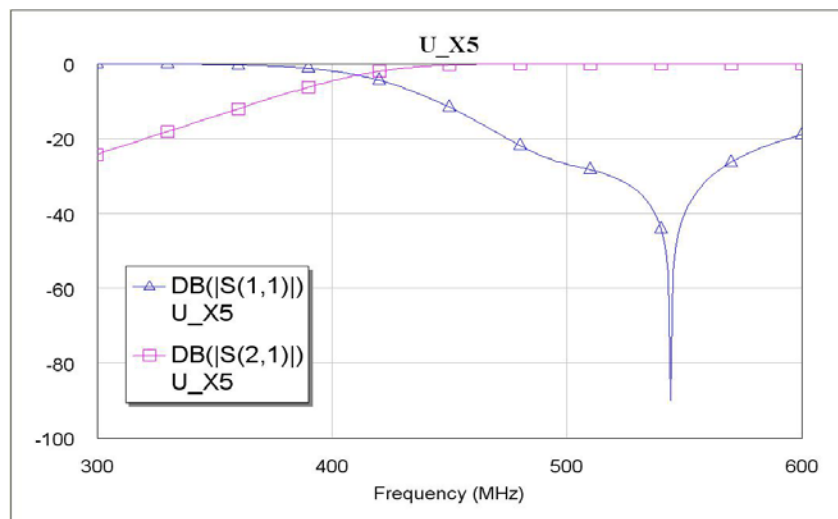
c = ความหนาหรือเบอร์ของเส้นลวด

n = จำนวนรอบของเส้นลวด

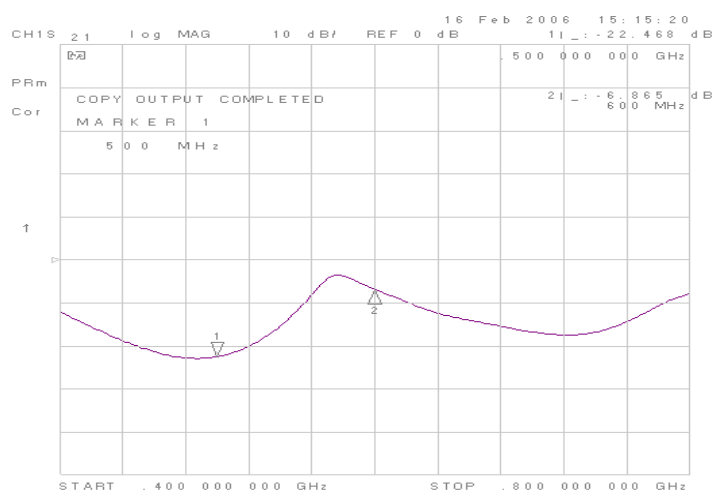
#### 4. HPF 300 MHz ((U\_X7, U\_X8))



รูปที่ 10.10 วงจรกรองความถี่ผ่านสูง 300 MHz



รูปที่ 10.11 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 300 MHz



รูปที่ 10.12 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 300 MHz

จากสูตรของการพันตัวเหนี่ยวนำ

$$L_0 = 21.4 \text{ nH} \quad a=4, b=2, c=0.25, n=3$$

ค่าของคาปาซิเตอร์ที่ใช้

$$C_0 = 4 \text{ pF}$$

$$C_1 = 2 \text{ pF}$$

**\*\*ค่า L ที่ได้จากคำนวณ โดย**

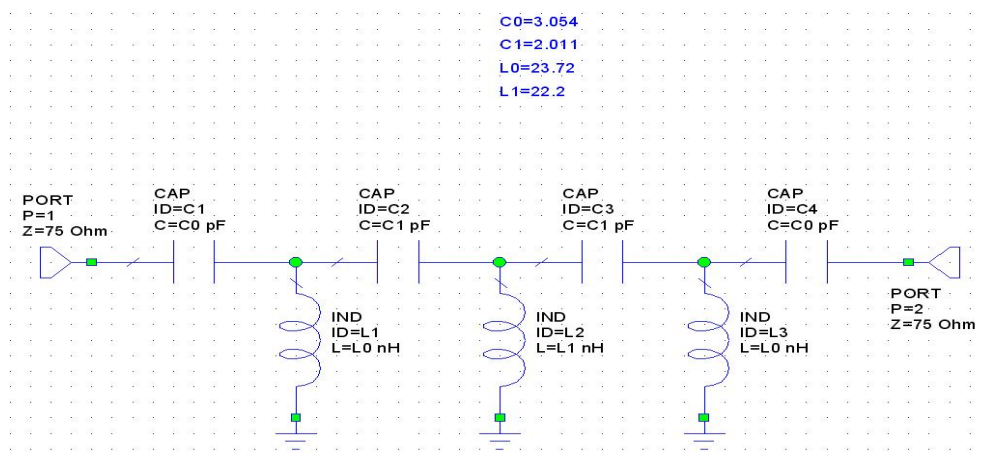
a = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

b = ความยาวของขดลวด

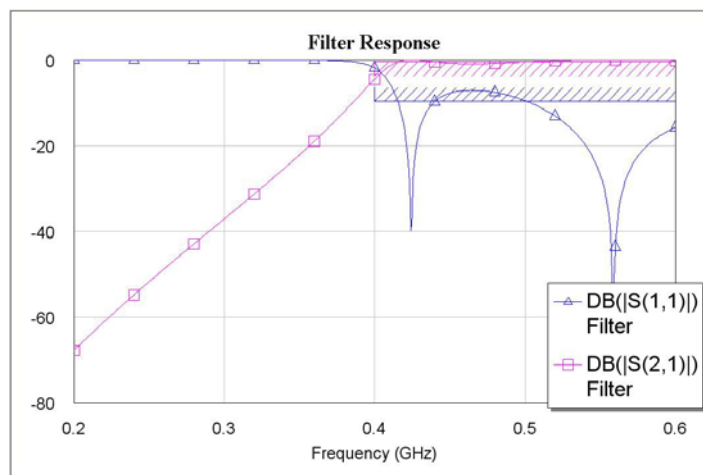
c = ความหนาหรือเบอร์ของเส้นลวด

n = จำนวนรอบของเส้นลวด

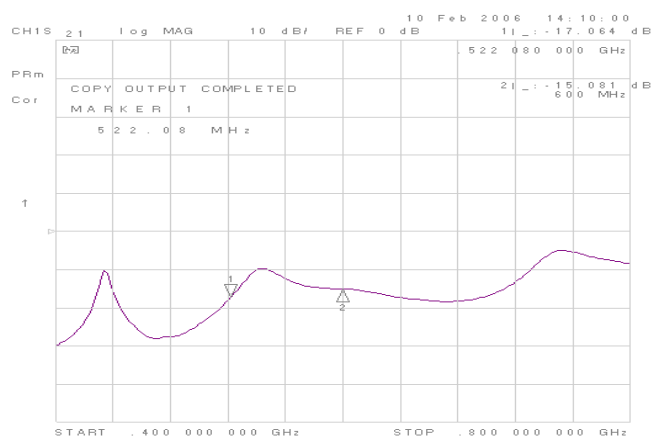
## 5. วงจรกรองความถี่สูง (High Pass Filter) ความถี่ 400 MHz ((U\_X5, U\_X6))



รูปที่ 10.13 วงจรกรองความถี่ผ่านสูง 400 MHz



รูปที่ 10.14 กราฟการตอบสนองจากโปรแกรมต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 400 MHz



รูปที่ 10.15 กราฟการตอบสนองจากเครื่อง Network Analysis ต่อวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 400 MHz

จากสูตรของการพัวตัวเหนี่ยวนำ

$$L_0 = 21.4 \text{ nH} \quad a=4, b=1, c=0.25, n=2$$

$$L_1 = 21.4 \text{ nH} \quad a=4, b=1, c=0.25, n=2$$

ค่าของคาปาซิเตอร์ที่ใช้

$$C_0 = 3 \text{ pF}$$

$$C_1 = 2 \text{ pF}$$

**\*\*ค่า L ที่ได้จากคำนวณ โดย**

a = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

b = ความยาวของขดลวด

c = ความหนาหรือเบอร์ของเส้นลวด

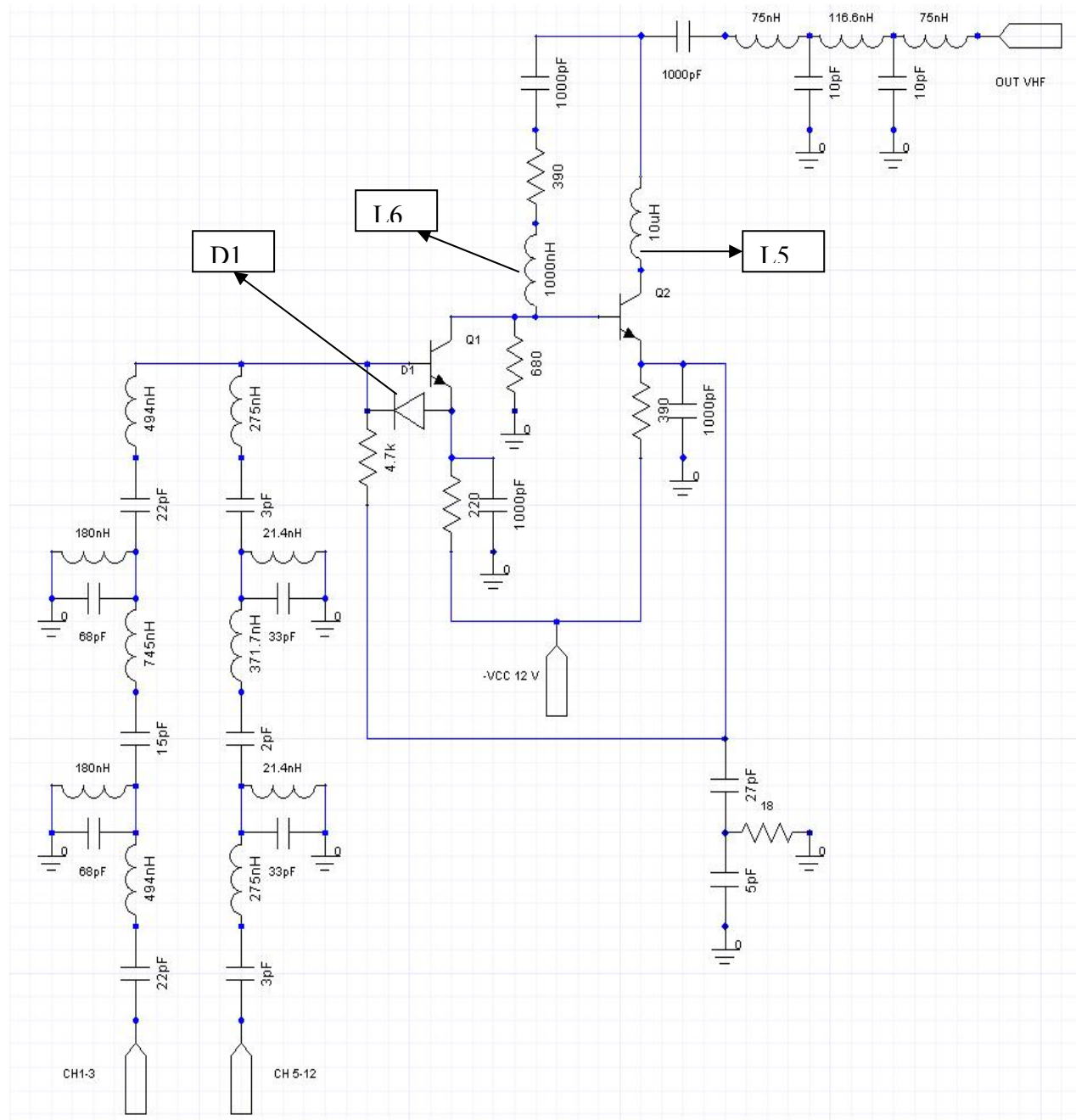
n = จำนวนรอบของเส้นลวด



ส่วนที่สอง....การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ(Amplifier)โดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2SC3355

### วงจรขยายสัญญาณย่านความถี่ VHF

ซึ่งได้จากการนำวงจรกรองความถี่ในย่านที่ต้องการคือ วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 30-70 MHz กับ วงจรกรองความถี่ผ่านตลอดย่าน 160-230 MHz เป็นวงจรกรองความถี่ขาเข้าของสัญญาณเพื่อกรองเอาเฉพาะความถี่ของสถานีโทรทัศน์เท่านั้นมาต่อกับวงจรขยาย และวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ 250 MHz เป็นขาออกของสัญญาณ



รูปที่ 10.16 วงจรขยายย่านความถี่ VHF โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2sc3355



รูปที่ 10.17 การตอบสนองของวงจรขยายย่านความถี่ VHF จากเครื่อง Network Analysis

#### IN LOW VHF

$L = 494 \text{ nH}$        $a=5, b=8, c=0.25, n=15$

$L = L4 = 180 \text{ nH}$     $a=5, b=4, c=0.25, n=7$

$L = 745 \text{ nH}$        $a=5, b=11, c=0.25, n=21$

#### IN VHF

$L = 275 \text{ nH}$        $a=5, b=6, c=0.25, n=10$

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=1, c=0.25, n=2$

$L = 371.7 \text{ nH}$      $a=5, b=8, c=0.25, n=13$

#### OUT VHF

$L = 75 \text{ nH}$                $a=4, b=3, c=0.25, n=5$

$L = 116.6 \text{ nH}$          $a=5, b=3, c=0.25, n=5$

**L** ทรานฟอเมอร์

L5 พันแกนกลาง 3 รอบ

**L** แกนอากาศ

L6= 1000 nH

**ไดโอด**

D1=1N4148

**\*\*ค่า L ที่ได้จากคำนวณ โดย**

a = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

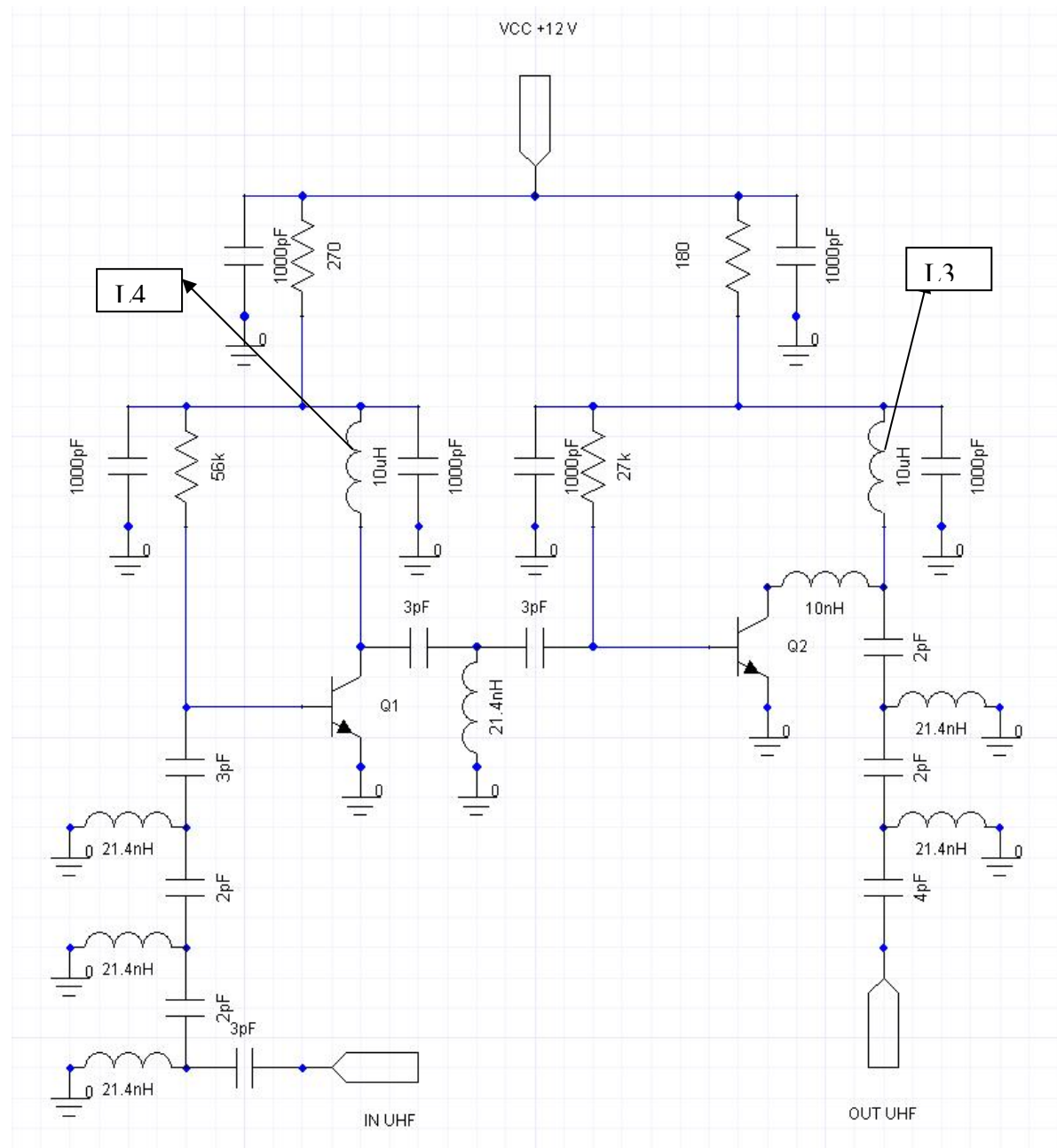
b = ความยาวของขดลวด

c = ความหนาหรือเบอร์ของเส้นลวด

n = จำนวนรอบของเส้นลวด

### วงจรขยายสัญญาณย่านความถี่ UHF

ขาเข้าของวงจรได้จากวงจรกรองความถี่ผ่านสูง 400 MHz มาต่อกับวงจรขยาย ขาออกเป็น  
วงจรกรองความถี่ผ่านสูง 300 MHz



รูปที่ 10.18 วงจรขยายย่านความถี่ UHF โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2sc3355



ความถี่ 450 MHz



ความถี่ 470 MHz



ความถี่ 490 MHz



ความถี่ 510 MHz



ความถี่ 540 MHz



ความถี่ 560 MHz

รูปที่ 10.19 การตอบสนองของวงจรขยายย่านความถี่ UHFจากเครื่อง Spectrum Analyzer

**IN UHF**

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=1, c=0.25, n=2$

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=1, c=0.25, n=2$

**OUT UHF**

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=2, c=0.25, n=3$

**L แกนเฟอร์ไรต์**

L3 แกนยาว 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวนรอบที่พันเส้นลวด 21 รอบ เส้นลวดรัศมี 0.2 มิลลิเมตร

**L แกนอากาศ**

$L4 = 10 \text{ micro-H}$        $a=5, b=4, c=0.25, n=7$

**\*\*ค่า L ที่ได้จากคำนวณ โดย**

$a$  = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด

$b$  = ความยาวของขดลวด

$c$  = ความหนาหรือเบอร์ของเส้นลวด

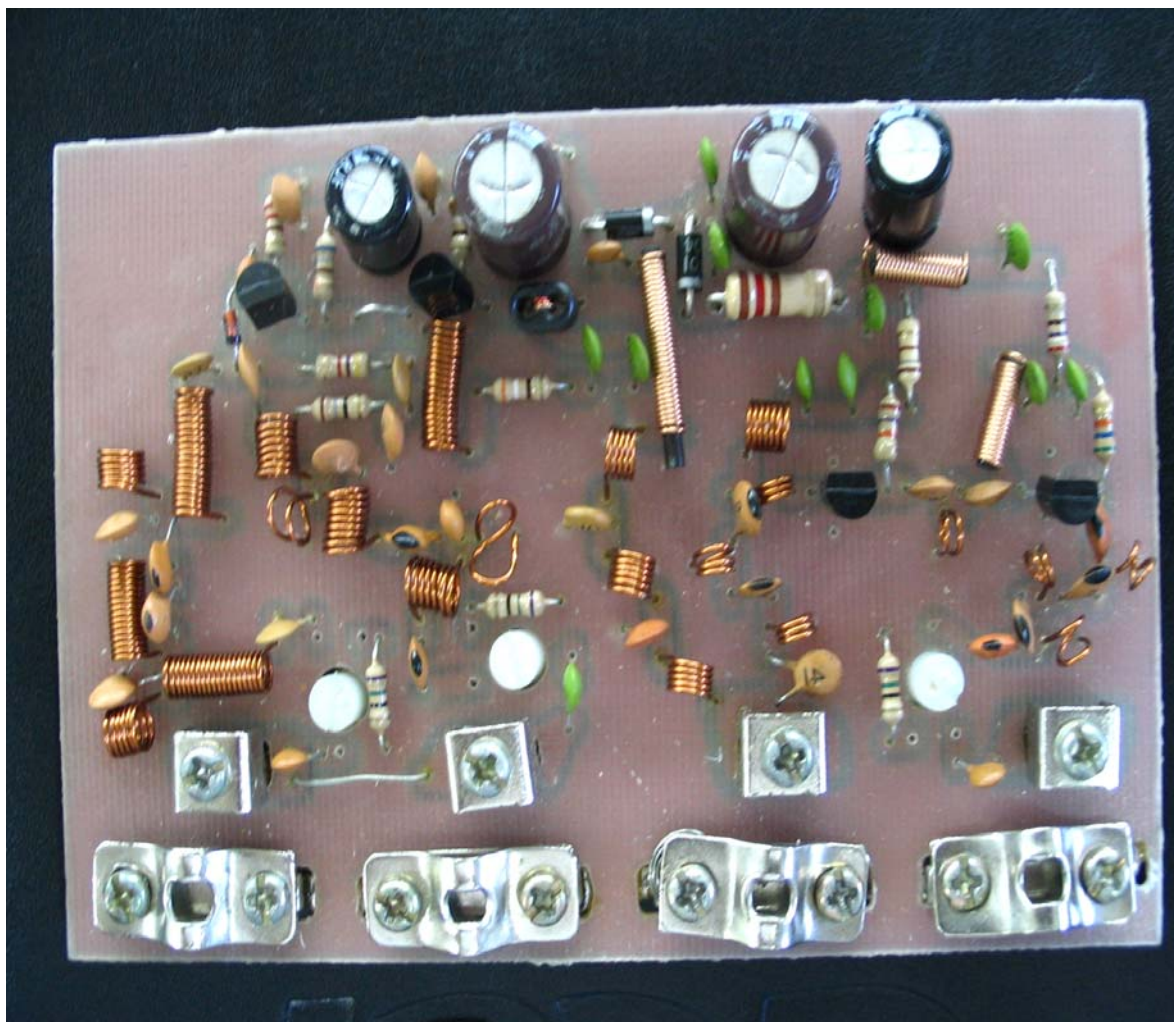
$n$  = จำนวนรอบของเส้นลวด

**ผลการออกแบบส่วนประกอบภายในของบูสเตอร์**

องค์ประกอบสำคัญภายในวงจรบูสเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือวงจรฟิวเตอร์ เลือกออกแบบโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางฟิวเตอร์เนื่องจากผลที่ได้จากโปรแกรมให้ผลตรงตามความถี่ที่ต้องการใช้งานมากกว่าการคำนวณทางทฤษฎี เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้คำนวณเป็นโปรแกรมมาตรฐานที่ได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวาง แต่การออกแบบด้วยตัวเองโดยทฤษฎีมีหลายตัวแปรที่ให้เลือกโดยไม่ทราบว่าตัวแปรไหนนำไปใช้งานดีที่สุด จึงทำให้วงจรคลาดเคลื่อนผิดจากที่เป็นจริง ผลของสัญญาณความถี่ที่ได้จากการวัดอยู่ในย่าน Low VHF, VHF และ UHF ซึ่งผลการวัดเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ และส่วนที่สองเป็นการออกแบบวงจรขยายสัญญาณในย่าน VHF และ UHF ผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่ออกแบบไว้ สัญญาณที่วัดได้มีการขยายสูงขึ้นประมาณ 20 dBm ในย่านความถี่ที่ต้องการ

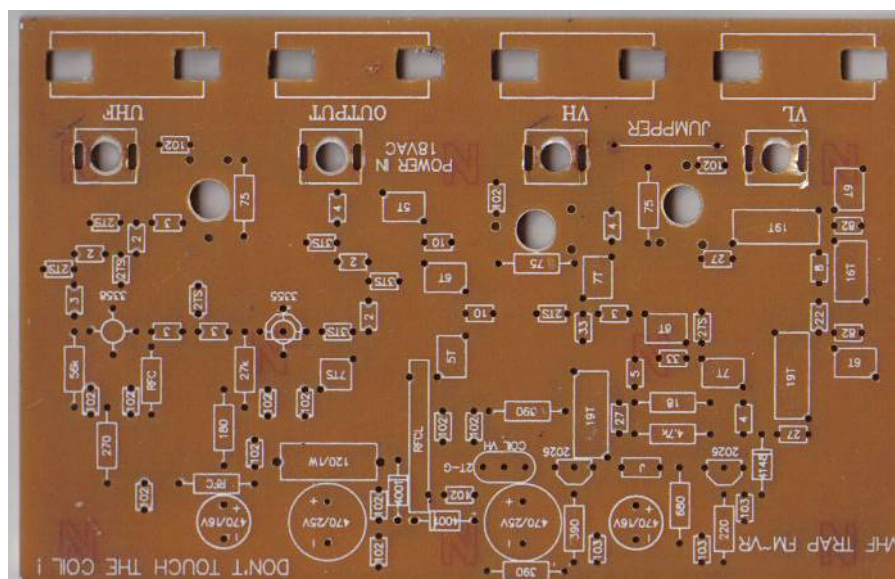


## บทที่ 11

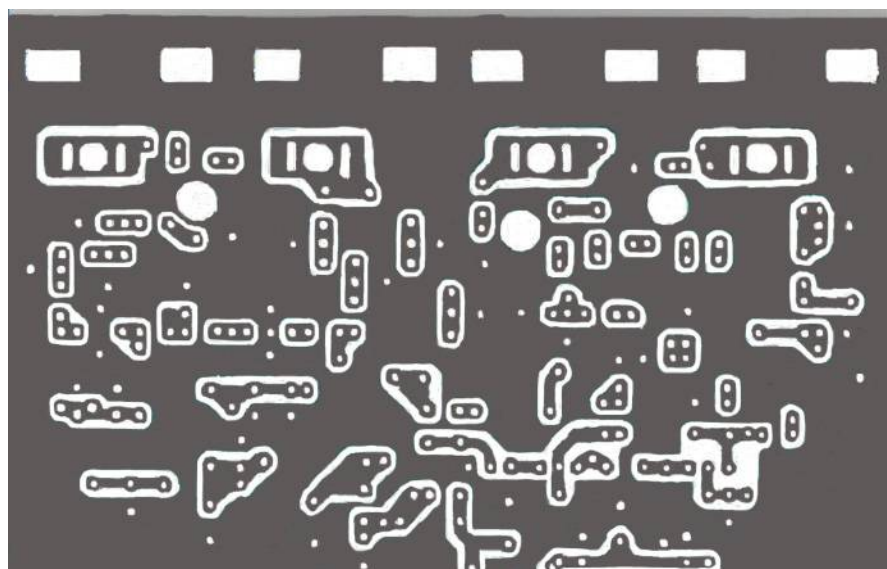
วงจรรวมและหลักการทำงานของบูสเตอร์

รูปที่ 11.1 ภาพวงจรสำเร็จของวงจรขยายสัญญาณโทรทัศน์แบนกว้าง

### วงจรจริงด้านหน้า



### วงจรจริงด้านหลัง







**IN LOW VHF**

$L = 494 \text{ nH}$        $a=5, b=8, c=0.25, n=15$

$L = L4 = 180 \text{ nH}$     $a=5, b=4, c=0.25, n=7$

$L = 745 \text{ nH}$        $a=5, b=11, c=0.25, n=21$

**IN VHF**

$L = 275 \text{ nH}$        $a=5, b=6, c=0.25, n=10$

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=1, c=0.25, n=2$

$L = 371.7 \text{ nH}$        $a=5, b=8, c=0.25, n=13$

**OUT VHF**

$L = 75 \text{ nH}$                        $a=4, b=3, c=0.25, n=5$

$L = 116.6 \text{ nH}$                    $a=5, b=3, c=0.25, n=5$

**IN UHF**

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=1, c=0.25, n=2$

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=1, c=0.25, n=2$

**OUT UHF**

$L = 21.4 \text{ nH}$        $a=4, b=2, c=0.25, n=3$

**L แกนเฟอร์ไรต์**

L1 แกนยาว 2 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวนรอบที่พันเส้นลวด 34 รอบ เส้นลวดรัศมี 0.2 มิลลิเมตร

L2 แกนยาว 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวนรอบที่พันเส้นลวด 21 รอบ เส้นลวดรัศมี 0.2 มิลลิเมตร

L3 แกนยาว 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวนรอบที่พันเส้นลวด 21 รอบ เส้นลวดรัศมี 0.2 มิลลิเมตร

**L แกนอากาศ**

$L4 = 180 \text{ nH}$        $a=5, b=4, c=0.25, n=7$

$L6 = 1000 \text{ nH}$        $a=5, b=11, c=0.25, n=19$

**L ทรานฟอเมอร์**

L5 พันแกนกลาง 3 รอบ

ไดโอด

D1=1N4148

D2=1N4001

**ทรานซิสเตอร์**

T1=T2=T3=T4= 2SC3355



ความถี่ 50 MHz



ความถี่ 60 MHz



ความถี่ 70 MHz



ความถี่ 160 MHz



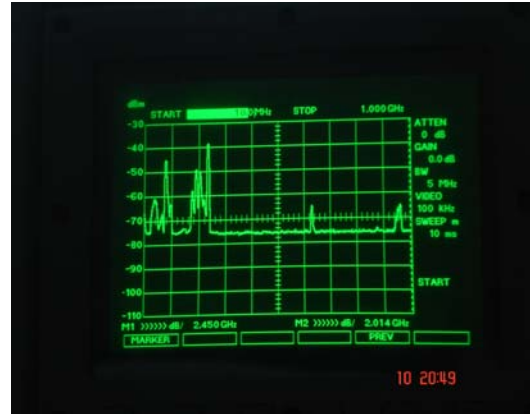
ความถี่ 180 MHz



ความถี่ 200 MHz



ความถี่ 220 MHz



ความถี่ 240 MHz



ความถี่ 490 MHz



ความถี่ 510 MHz



ความถี่ 530 MHz



ความถี่ 550 MHz

รูปที่ 11.3 ภาพการตอบสนองของวงจรขยายสัญญาณรวมวัดจากเครื่อง Spectrum Analyzer

## บทที่ 12

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการทำโครงการ

จากการทำโครงการการออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบนด์กว้าง โดยแยกทำเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบภายใน และส่วนที่เป็นวงจรบูสเตอร์รวม ในด้านส่วนที่เป็นองค์ประกอบภายในนั้นประกอบด้วย filter ในย่านความถี่ VHF และ UHF วงจร Amplifier ขยายสัญญาณย่านความถี่ VHF และ UHF จากการออกแบบวงจรทั้ง 2 ประเภทด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎี และการออกแบบโดยใช้โปรแกรมคำนวณ โดยวงจรฟิวเตอร์จะออกแบบโดยใช้โปรแกรมคำนวณซึ่งให้ผลอยู่ในช่วงความถี่โทรทัศน์ที่ต้องการ และเมื่อออกแบบวงจรขยายสัญญาณโดยทฤษฎีการคำนวณ จากการต่อวงจรขยายสัญญาณร่วมกันกับฟิวเตอร์เพื่อใช้ขยายสัญญาณในย่านความถี่ที่ต้องการ ผลที่ได้คือสามารถขยายสัญญาณได้สูงขึ้นประมาณ 20dBm ส่วนที่สองคือการออกแบบวงจรรวมของบูสเตอร์ โดยแต่ละส่วนเกิดจากการนำองค์ประกอบภายในมารวมกันและทำงานอย่างเป็นระบบ โดยหลักการทำงานของบูสเตอร์โดยรวมมีดังนี้ เมื่อติดตั้งวงจรขยายสัญญาณแบนด์กว้างหรือบูสเตอร์กับสายอากาศภายนอกบ้าน สัญญาณจากแผงรับสัญญาณของสายอากาศที่มีกำลังอ่อนจะผ่านเข้าสู่วงจรบูสเตอร์ทางด้านอินพุตเข้ามาผ่านวงจรกรองความถี่ 3 ย่านคือ Low VHF , VHF และ UHF โดยจะตัดความถี่อื่นออกไป จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกขยายด้วยวงจรแอมพลิฟายเออร์ให้มีความแรงเพิ่มมากขึ้น และกรองด้วยฟิวเตอร์อีกชั้นหนึ่ง สัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังเอาต์พุต ที่ต่อกับเพาเวอร์ซัพพลายอยู่ เพื่อที่จะนำสัญญาณอาร์เอฟที่มีความแรงจากการขยายเข้าไปสู่เครื่องรับโทรทัศน์ อีกทั้งเพาเวอร์ซัพพลายก็ยังทำหน้าที่ส่งไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาในวงจรบูสเตอร์และเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวงจรเรกติไฟเออร์ เพื่อส่งไปไบแอสทรานซิสเตอร์ภายในวงจรต่อไป จะเห็นได้ว่าการใช้งานบูสเตอร์เพื่อขยายสัญญาณโทรทัศน์ และเหมาะที่จะใช้งานในแถบชนานเมืองที่ได้รับสัญญาณโทรทัศน์ความแรงต่ำกับบ้านเรือน และอาคารขนาดเล็ก

จากการทำโครงการในครั้งนี้ ทำให้ทางกลุ่มของข้าพเจ้าได้เรียนรู้และมีประสบการณ์หลายๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็นการนำทฤษฎี RF Circuit , Filter , Amplifier และความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาใช้งานจริงในการออกแบบวงจร การได้ฝึกฝนทักษะการประกอบวงจรในรูปแบบต่างๆ ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญและความอดทนเป็นอย่างสูง เนื่องจากการออกแบบทางทฤษฎีกับการปฏิบัติไม่ได้สอดคล้องกันเสมอไป ได้เรียนรู้การใช้เครื่องมือวัดต่างๆ ในห้องปฏิบัติการโทรคมนาคมว่ามีหน้าที่และเทคนิคการวัดอย่างไร อาทิเช่น Regulated DC Power Supply , Oscilloscope , Sinal Generator , Spectrum analyzer และ Network Analyzer เป็นต้น ฝึกฝนการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และ

สรุปการทำงานอย่างเป็นระบบ รวมทั้งแก้ไขข้อผิดพลาดบางอย่างที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

อุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานมีหลายสาเหตุด้วยกัน ตั้งแต่การเบี่ยงงบประมาณที่ล่าช้า สมาชิกในกลุ่มขาดความชำนาญในการประกอบวงจร จึงต้องใช้เวลาานพอสมควร ในการฝึกฝนทักษะกว่าที่จะได้วงจรที่มีความถี่และความแรงตามที่ต้องการได้ ไม่มีเครื่องมือที่เพียงพอโดยเฉพาะเครื่องวัดค่าตัวเหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องประมาณค่าตัวเหนี่ยวนำเอง ทำให้วงจรเกิดความคลาดเคลื่อนส่งผลถึงสัญญาณที่วัดได้ก็มีความผิดพลาดไปด้วย

### ข้อเสนอแนะ

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบนกว้าง เพื่อขยายสัญญาณโทรทัศน์ให้มีกำลังสูงขึ้น เมื่อทำการออกแบบ ผลที่ได้ตามทฤษฎีและทางปฏิบัติจะมีความแตกต่างกัน ด้วยข้อจำกัดที่ว่าไม่มีเครื่องมือวัดค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต้องอาศัยความละเอียด จึงทำให้วงจรเกิดความคลาดเคลื่อนผลที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ และถ้าต้องการเพิ่มกำลังขยายให้สูงขึ้น โดยการเปลี่ยนทรานซิสเตอร์ที่มีคุณภาพดีขึ้น แต่ราคาก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

## บรรณานุกรม

- [1] ไกรเลิศ สุวรรณทรัพย์. **เรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของสายอากาศ**, สำนักพิมพ์ Computer electronic world ฉบับที่142, 2536
- [2] บุญชัด เนติศักดิ์. (2541), **ทฤษฎีและปฏิบัติเครื่องรับโทรทัศน์ เล่ม 1**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [3] ประดิษฐ์ วัชรไพบูรณ์. **เครื่องส่งวิทยุและโทรทัศน์**. กรุงเทพฯ ฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] ปรัชมนันท์ นิลสุข. **ทฤษฎีและการทำงานของเครื่องรับโทรทัศน์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [5] พงษ์ศักดิ์ สุตัมพันธ์ไพบูรณ์ม, **ระบบสายอากาศและรูปแบบการติดตั้ง**, สำนักพิมพ์ Computer electronic world ฉบับที่152, 2538
- [6] สมคิด วิริยประสิทธิ์ชัย และคณะ, **ความรู้เบื้องต้นทางอิเล็กทรอนิกส์**. กรุงเทพฯ: ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- [7] Advance Engineering Group, **อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ:ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- [8] CyberSpace Group, **ประเภทของคลื่นวิทยุ**[homepage]. Available From:  
URL:<http://www.kminb05.kmitnb.ac.th/~mte98012/chapter 06.htm>.
- [9] Reinhold Ludwig and Pavel Bretchko , **RF Circuit Design Theory and Applications**, Prentice Hall USA New Jersey, 2000



### ประวัติผู้เขียน

นางสาวกนกวรรณ มกรพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 สิงหาคม พ.ศ. 2527  
 ภูมิลำเนาเดิม ต.โนเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา  
 สำเร็จชั้นประถมศึกษาจาก โรงเรียนมารีย์วิทยา จ.นครราชสีมา  
 สำเร็จชั้นมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนสุรนารีวิทยา จ.นครราชสีมา  
 เข้าเรียนระดับอุดมศึกษาในปี พ.ศ. 2545 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นายสมชาติ อักโข เกิดเมื่อวันที่ 10 ธันวาคม พ.ศ. 2526  
 ภูมิลำเนาเดิม ต.น้ำโสม อ.น้ำโสม จ.อุดรธานี  
 สำเร็จชั้นประถมศึกษาจาก โรงเรียนบ้านโนนสมบูรณ์ จ.อุดรธานี  
 สำเร็จชั้นมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนน้ำโสมพิทยาคม จ.อุดรธานี  
 เข้าเรียนระดับอุดมศึกษาในปี พ.ศ. 2545 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวฤชกานต์ พลพิทักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527  
 ภูมิลำเนาเดิม ต.กวนวัน อ.เมือง จ.หนองคาย  
 สำเร็จชั้นประถมศึกษาจาก โรงเรียนอนุบาลหนองคาย จ.หนองคาย  
 สำเร็จชั้นมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จ.หนองคาย  
 เข้าเรียนระดับอุดมศึกษาในปี พ.ศ. 2545 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

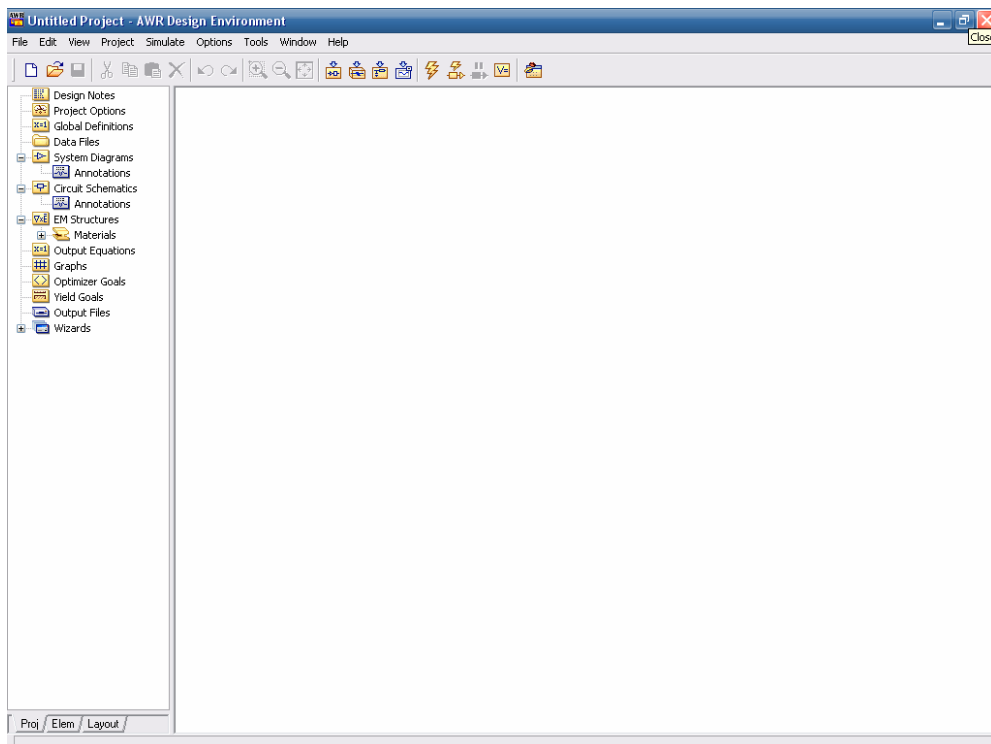
# ภาคผนวก

## การใช้โปรแกรม Microwave office 2004

การออกแบบโดยใช้โปรแกรมนี้จะช่วยลดข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ เนื่องจากการคำนวณแต่ละสูตรของการคำนวณเป็นสูตรที่ยาวและซับซ้อน และข้อดีของการใช้โปรแกรมคือสามารถดูผลการตอบสนองของวงจรที่ออกแบบได้ จึงช่วยให้ผู้ออกแบบมองเห็นภาพรวมของวงจรที่เป็นส่วนสำคัญของการออกแบบ การใช้โปรแกรมจะให้ผลการตอบสนองของวงจรที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการ ส่วนการคำนวณบางครั้งจะพบว่าผลการตอบสนองของวงจรผิดไปจากที่ออกแบบไว้มากๆ การออกแบบด้วยโปรแกรมทำให้สามารถเปลี่ยนอุปกรณ์ได้ตลอดเวลา ซึ่งช่วยมากในกรณีที่ออกแบบมาแล้วแต่ค่าของอุปกรณ์ไม่มีขาย ในโปรแกรมสามารถแทนค่าของอุปกรณ์ที่ไม่มีด้วยค่าที่ใกล้เคียงแล้วทำการจำลองผลของวงจร แล้วเลือกค่าอุปกรณ์ที่ทำให้ผลการตอบสนองเหมาะสมกับวงจรที่ต้องการ และเนื่องจากการออกแบบโดยใช้โปรแกรมนี้การออกแบบทุกชนิดของวงจรรองความถี่นั้นจะออกแบบคล้ายๆ กันจึงขอยกตัวอย่างการออกแบบวงจรรองความถี่ผ่านต่ำเป็นตัวอย่างของการออกแบบ

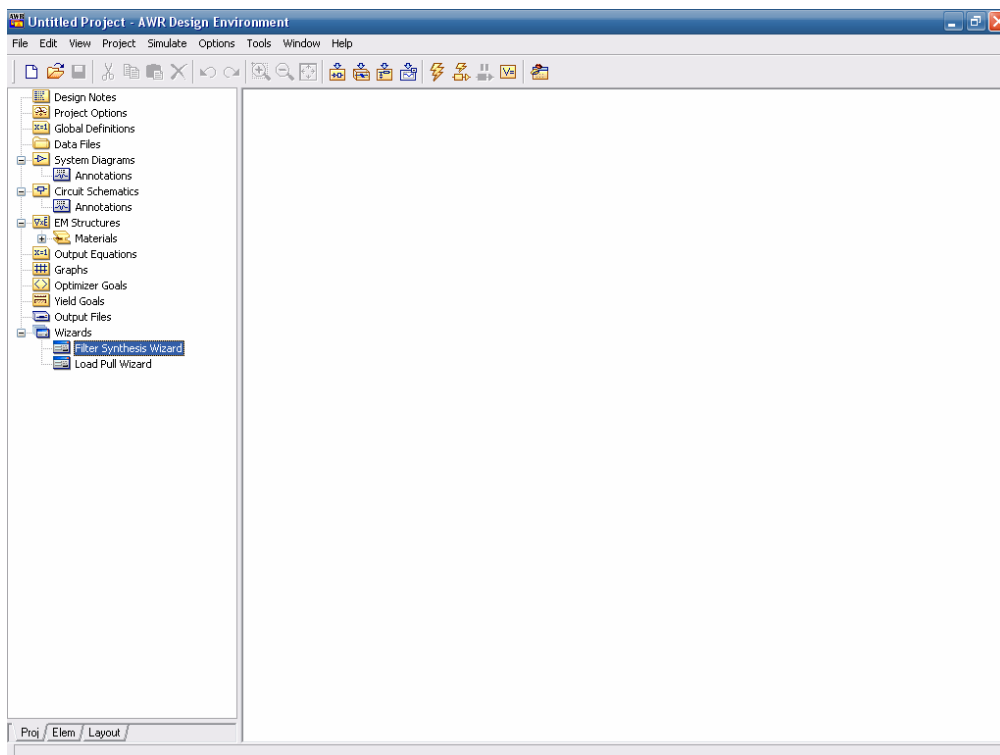
### การออกแบบ Low-pass filter

โปรแกรมเป็นโปรแกรมเรียบง่ายโดยด้านบนใช้เป็นเมนูเหมือนกับโปรแกรมทั่วไป ส่วนกรอบด้านซ้ายมือเป็นเมนูที่รองรับการสร้างวงจร เช่น การสร้างกราฟการตอบสนอง

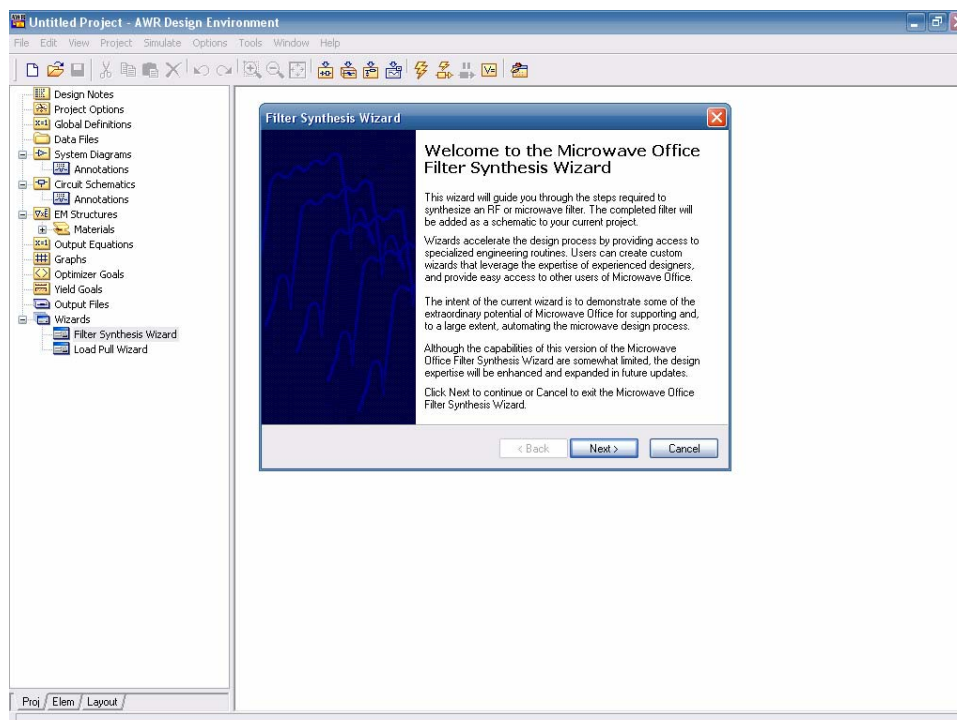


รูปที่13.1 รูปหน้าต่างเริ่มเข้าโปรแกรม

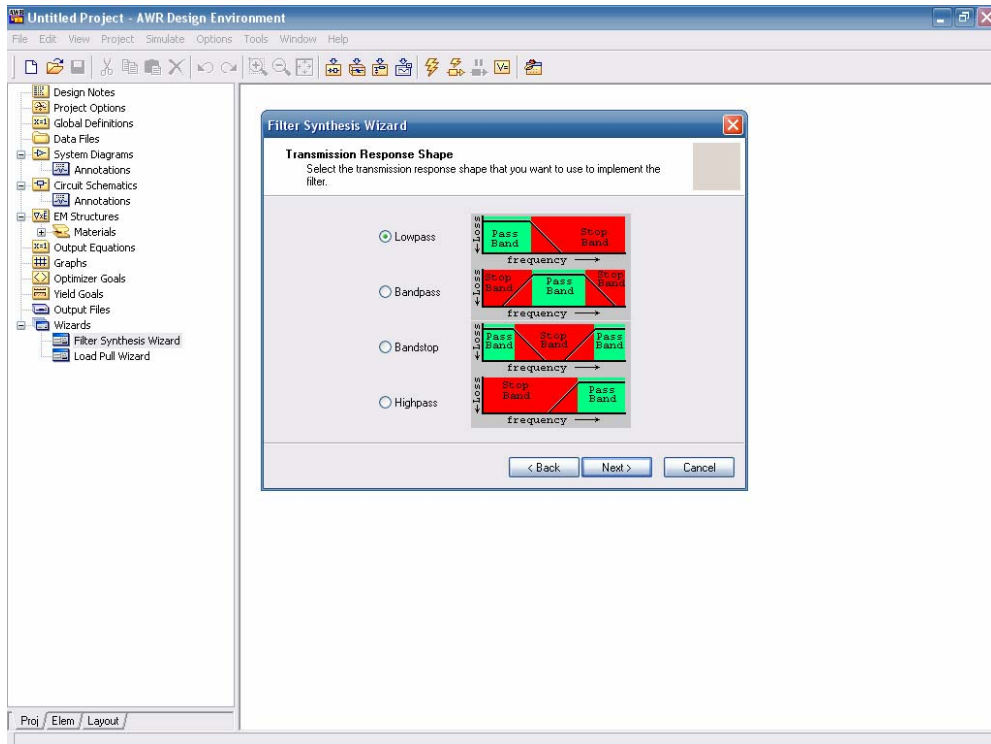
การออกแบบโดยการให้โปรแกรมคำนวณค่าอุปกรณ์ให้ทุกๆตัว สามารถเลือกได้ว่าจะเลือกแบบอุปกรณ์ขนานก่อนหรืออนุกรมก่อน และการทำให้โปรแกรมคำนวณโปรแกรมจะสร้างกราฟการตอบสนองให้ด้วย



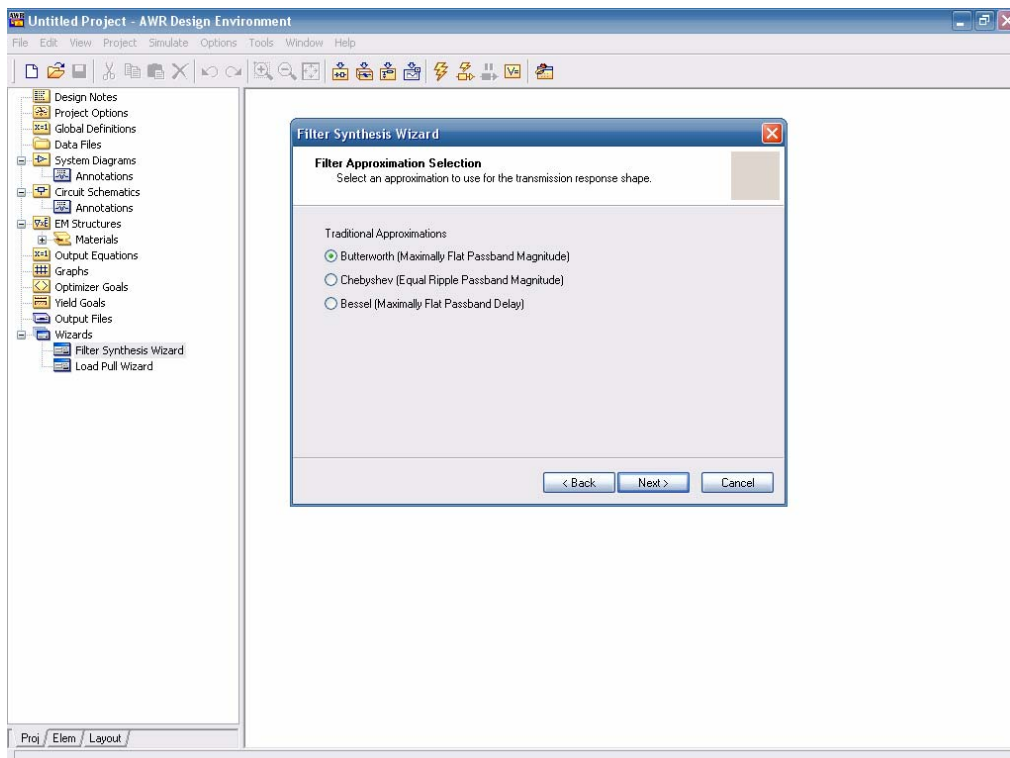
รูปที่13.2รูปการออกแบบโดยใช้ Wizards ออกแบบโดยให้โปรแกรมคำนวณค่าอุปกรณ์ให้



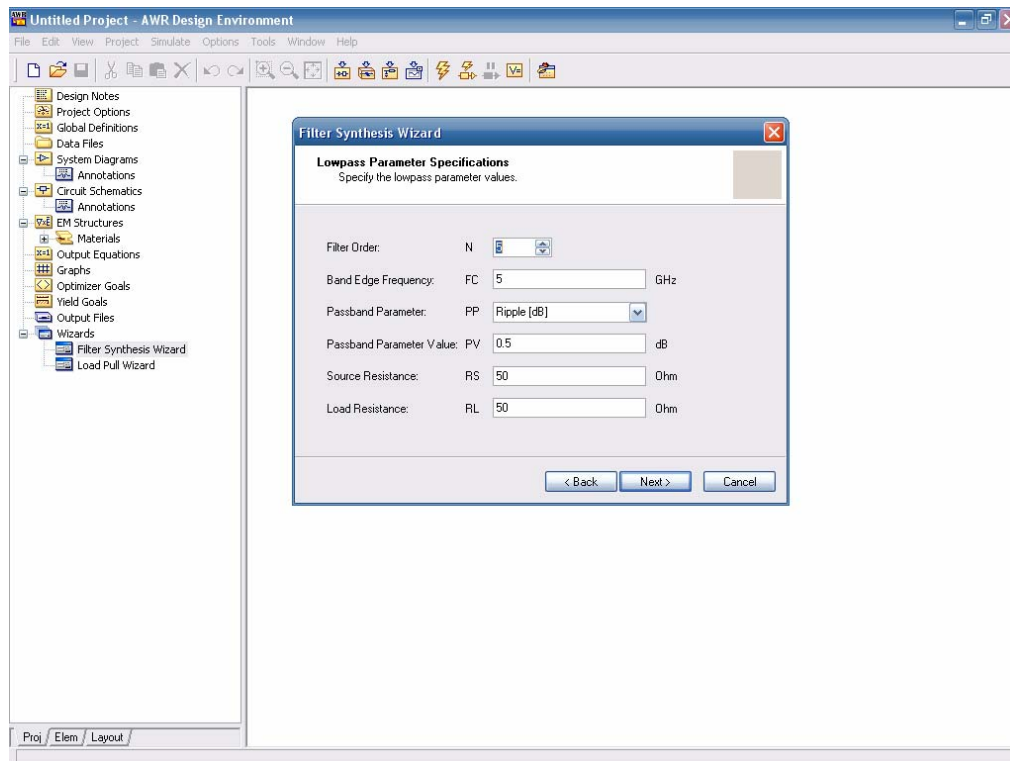
รูปที่13.3 รูปหน้าต่างต้อนรับของ Wizards



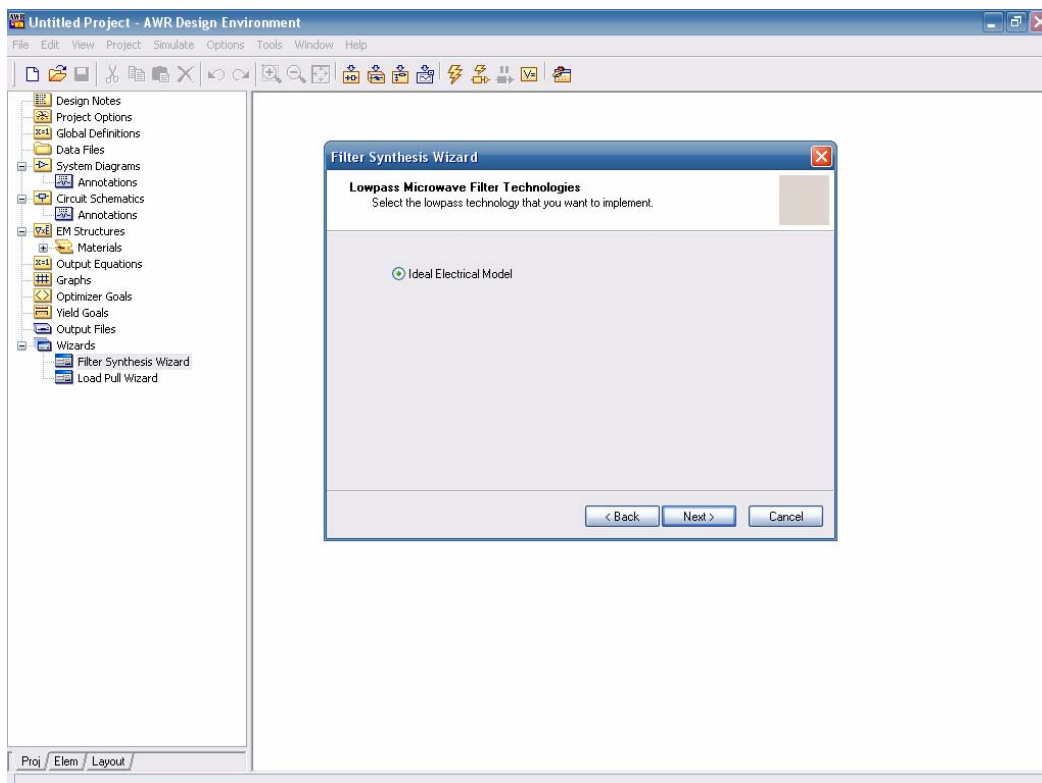
รูปที่ 13.4 รูปหน้าต่างในการเลือกชนิดของวงจรกรองความถี่ โดยแต่ละชนิดก็จะมีกำหนดความถี่และรายละเอียดอื่นๆที่แตกต่างกันไป



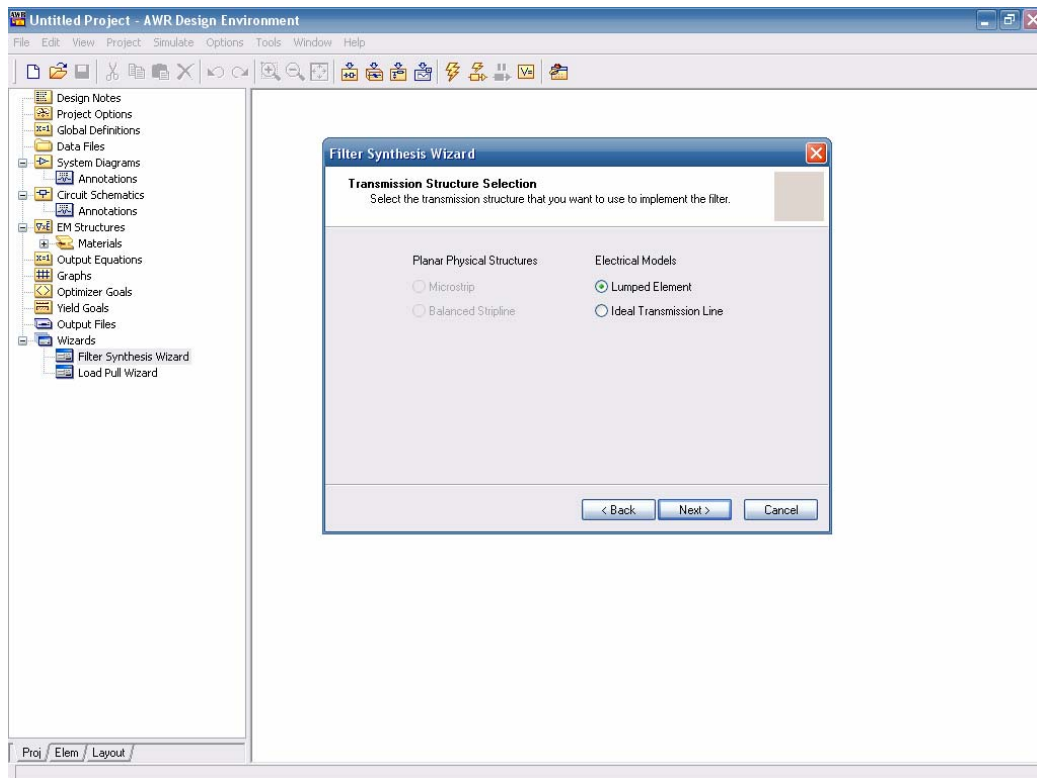
รูปที่ 13.5 รูปการเลือกรูปแบบของสมการที่คำนวณ ส่วนมากจะเลือกสมการแบบ Chebyshev มากกว่าสมการอื่นๆ เนื่องจากให้การตอบสนองที่ดีและเร็วกว่าสมการอื่น



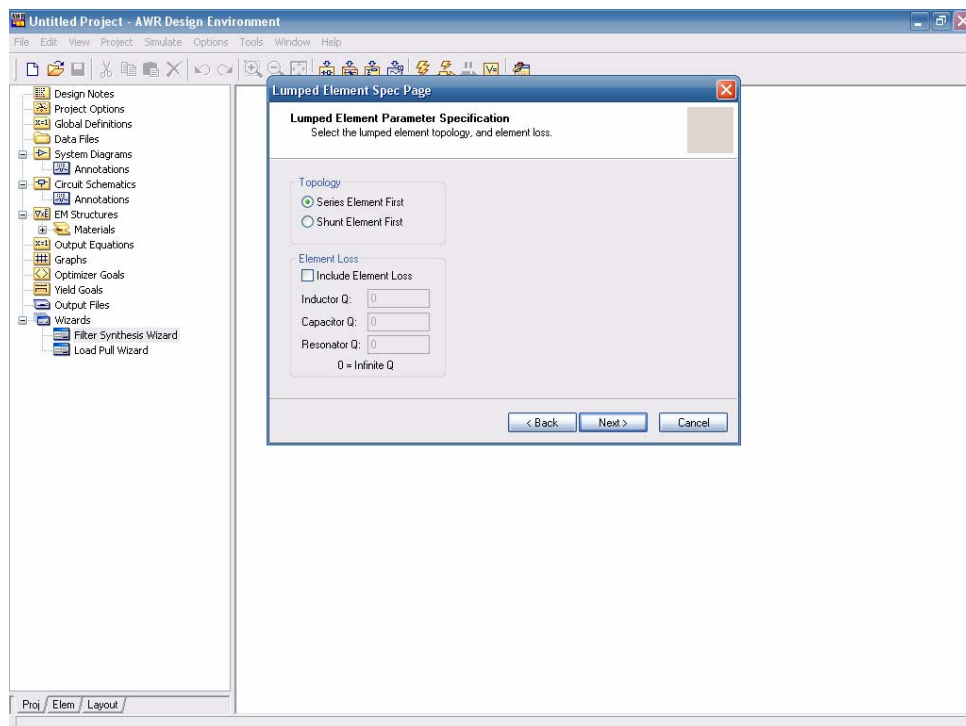
รูปที่ 13.6 รูปการกำหนดค่าต่างๆ ให้วงจรกรอง เช่น ความถี่ อันดับของวงจร เลือกโหนดของวงจร และเลือกค่า Ripple ซึ่งจะมีผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม



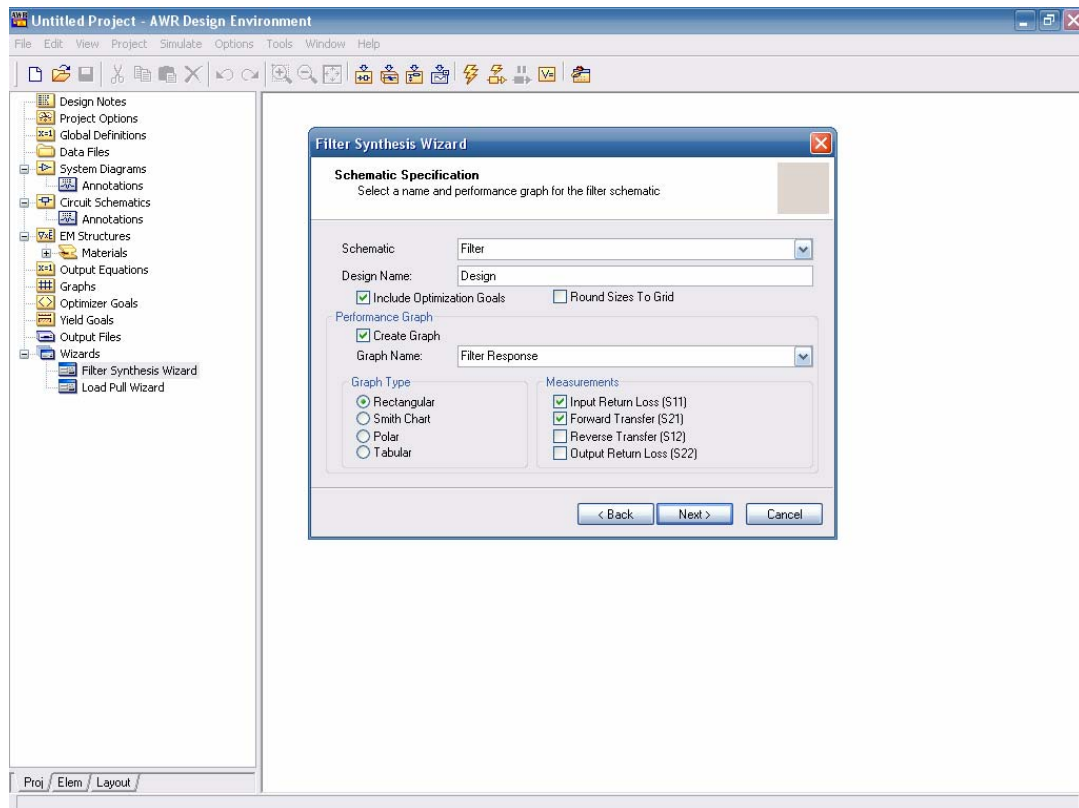
รูปที่ 13.7 รูปโปรแกรมเลือกอุปกรณ์เป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการลดทอน



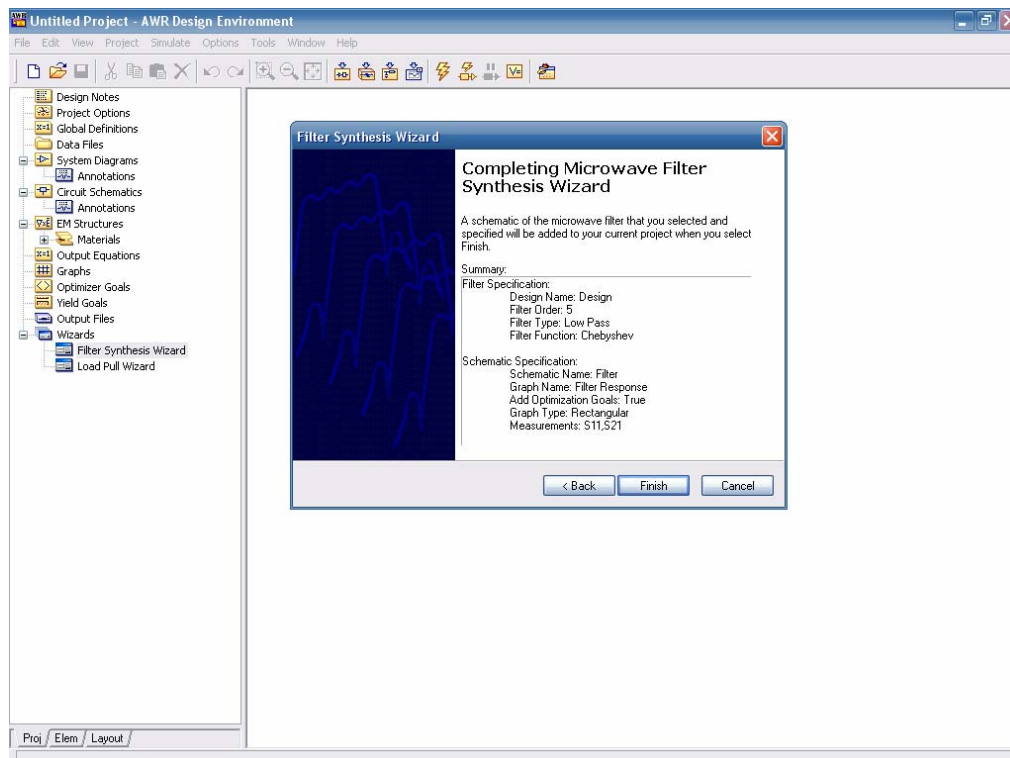
รูปที่ 13.8 รูปการเลือกอุปกรณ์เป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะต้องเลือก Electrical Models เป็น Lumped Element



รูปที่ 13.9 รูปการเลือกอุปกรณ์ตัวแรกให้ขั้วนำหรืออนุกรม และเลือกการสูญเสียของอุปกรณ์แต่ส่วนมากการใช้โปรแกรมจะไม่ได้ค่าการสูญเสีย

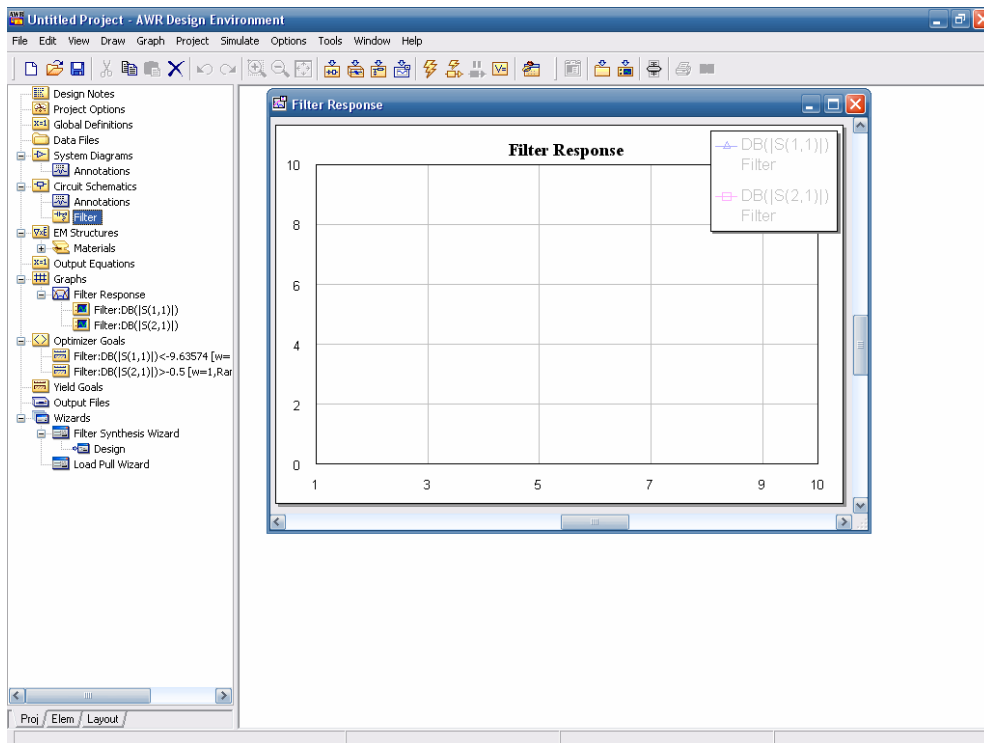


รูปที่ 13.10 รูปการตั้งชื่อของวงจรและกราฟ เลือกชนิดกราฟผลการตอบสนองและรายละเอียดของกราฟชนิดนั้นๆ

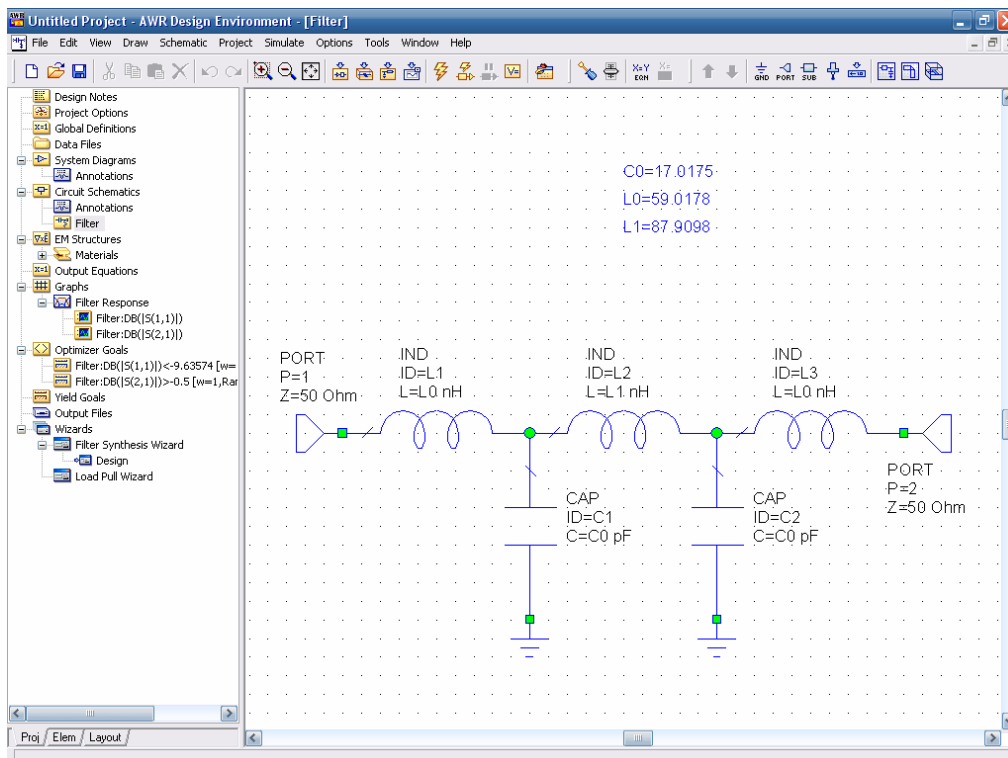


รูปที่ 13.11 รูปโปรแกรมรายงานรายละเอียดของวงจรที่ป้อนให้แก่โปรแกรมเพื่อทำการคำนวณและชื่อต่างๆของวงจรที่สร้างขึ้น

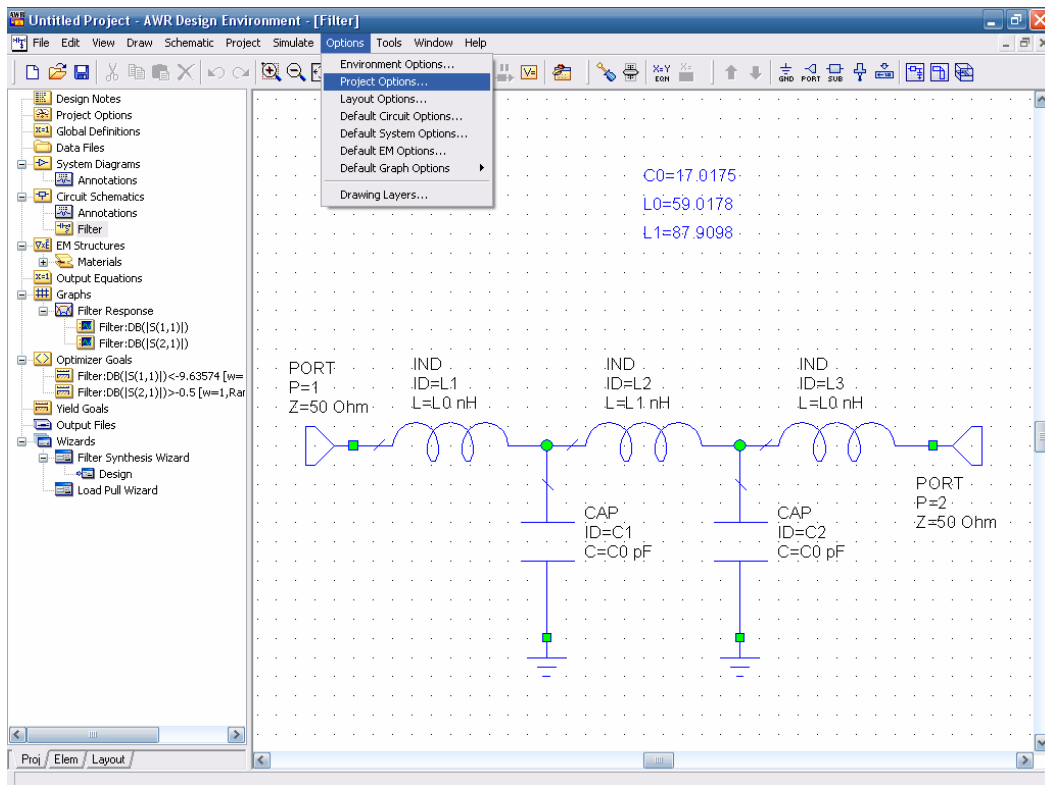




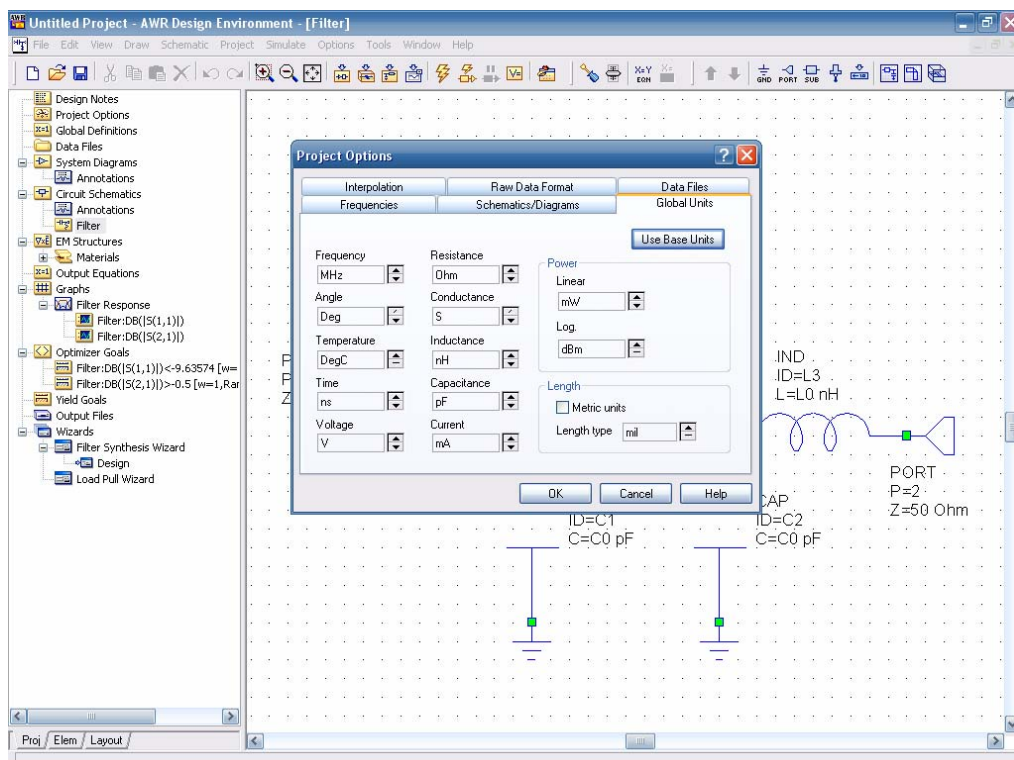
รูปที่13.12 รูปโปรแกรมเมื่อออกแบบสมบูรณ์



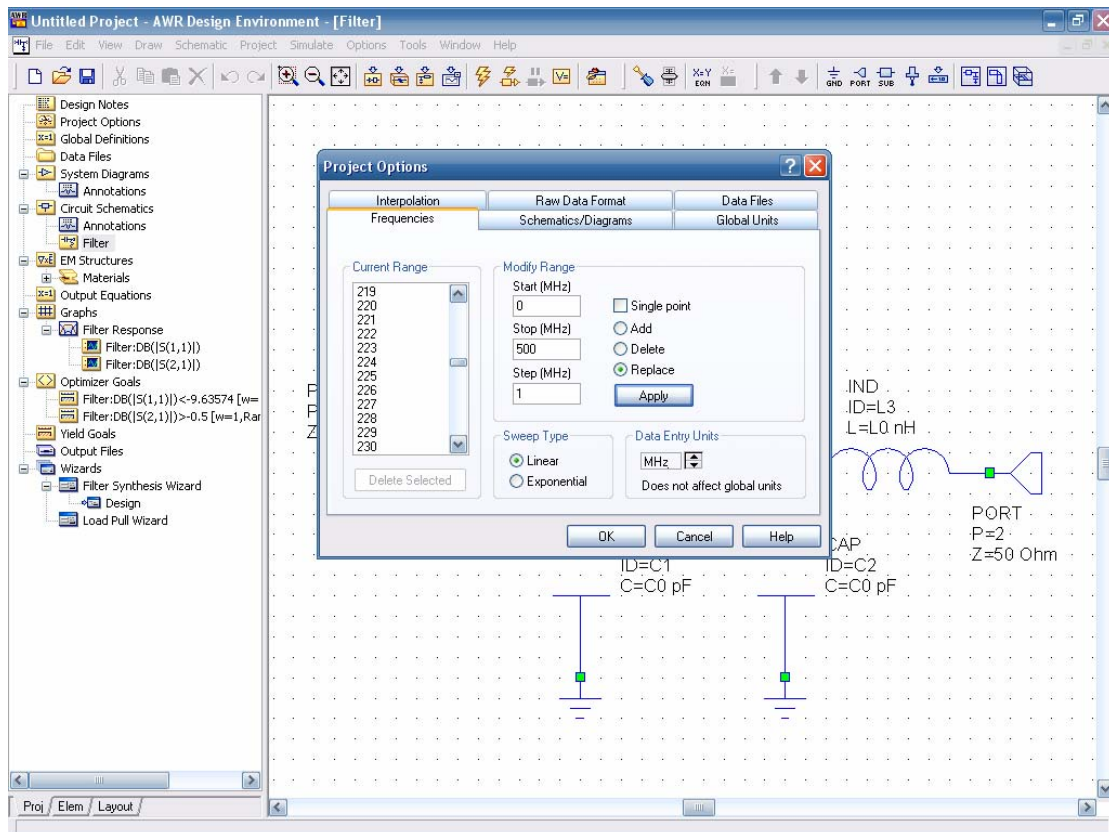
รูปที่13.13 รูปวงจรที่ได้เมื่อออกแบบสมบูรณ์จะสังเกตว่าค่าของอุปกรณ์จะอยู่ด้านบนของวงจร แต่  
ก็สามารถนำค่านี้มาใส่อุปกรณ์แต่ละตัวได้



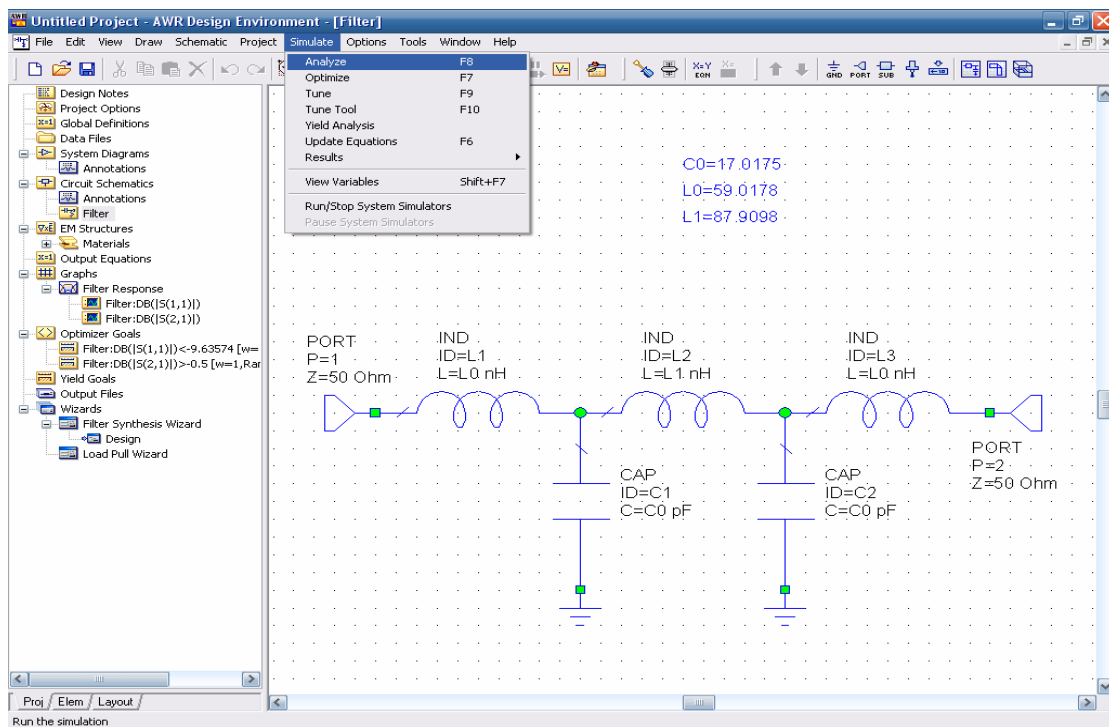
รูปที่13.14 รูปการตั้งค่าให้วงจรเพื่อที่จะดูกราฟการตอบสนอง



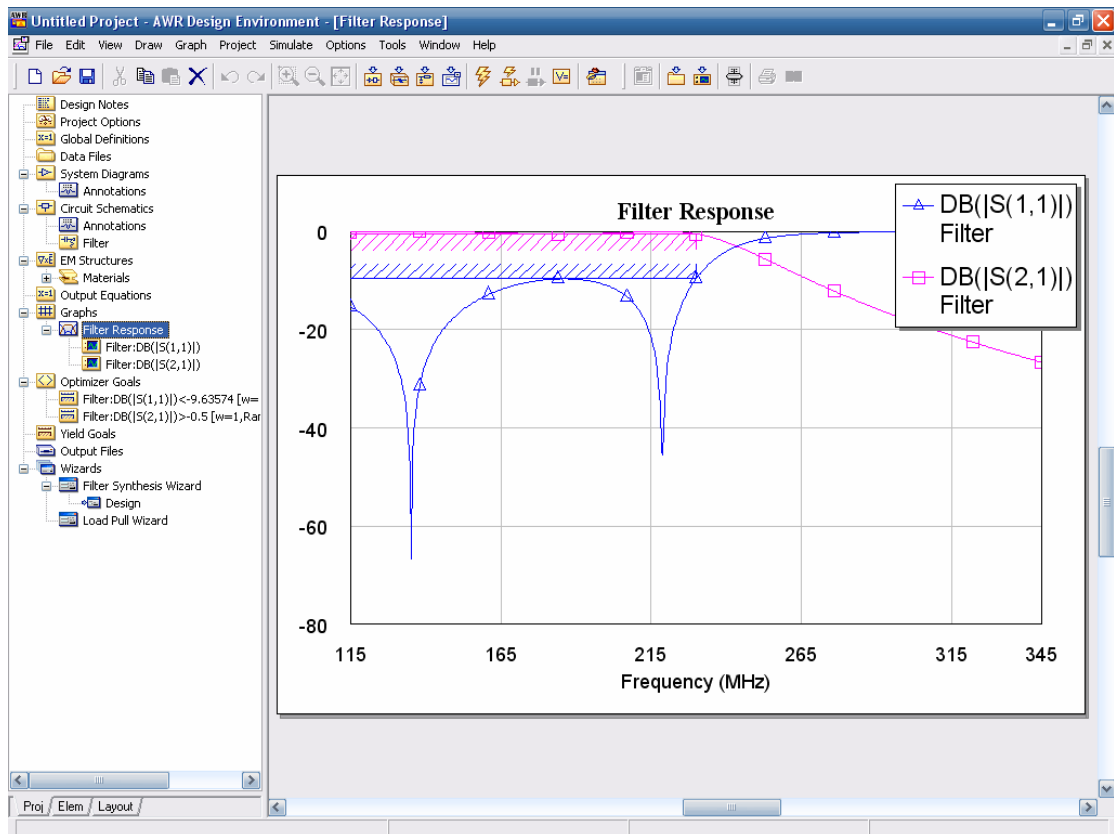
รูปที่13.15 รูปการกำหนดความถี่ให้เหมาะสมกับวงจรว่าจะกำหนดหน่วยของความถี่ที่ใช้ในโปรแกรมเป็นหน่วยเล็กหรือใหญ่



รูปที่ 13.16 รูปการเลือกความถี่ให้โปรแกรมแสดงการตอบสนอง โดยการกำหนดความถี่เริ่มต้นและสิ้นสุด และความละเอียดของความถี่



รูปที่ 13.17 รูปการวิเคราะห์วงจรเพื่อดูกราฟการตอบสนองของวงจร



รูปที่13.18 รูปกราฟการตอบสนองที่ได้จากโปรแกรม โดยการดูจาก S21 ได้โดยค่าจะต้องใกล้เคียงกับศูนย์ที่ความถี่ที่ต้องการจึงจะถือว่าเป็นวงจรที่ดี